

# **DES SCIENCES NAÏVES A L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE :**

## **UN APPORT DE LA PHILOSOPHIE DES SCIENCES ET DES SCIENCES COGNITIVES A LA MEDIATION SCIENTIFIQUE**

**Richard-Emmanuel EASTES,**  
Département d'Etudes Cognitives (Ecole normale supérieure - Paris)

**Francine PELLAUD,**  
Laboratoire de didactique et d'épistémologie des sciences (Université de Genève - Suisse)

### **MOTS-CLEFS**

Approche descriptive, leçon de choses, approche formelle, sciences naïves, sens physique, science ressentie et incarnée, phénoménologie, approche phénoménologique inspirée, reformulation, « dé-formalisation », apprendre, pédagogie, médiation scientifique, enseignement des sciences.

### **RESUME**

La perception du monde par le prisme des modèles scientifiques conduit à une appréhension théorique des phénomènes, d'autant plus performante sur les plans interprétatif et prédictif qu'elle se présente souvent de manière formalisée. C'est l'approche des chercheurs, que l'on retrouve sous une forme épurée et simplifiée dans l'enseignement des sciences dès le collège, mais également sous une forme appauvrie et parfois déformée dans les différentes formes de la médiation scientifique.

Or si elle s'avère appropriée pour expliciter des liens, mettre à jour des mécanismes, imaginer des applications technologiques et effectuer des applications numériques, cette approche formelle est en revanche relativement pauvre sur le plan explicatif<sup>1</sup>, tant les formalismes masquent souvent le véritable sens des processus dont ils rendent compte. Se contenter d'une approche descriptive, et à moins qu'il ne s'agisse de présenter des classifications et des typologies, sera également insuffisant pour permettre d'accéder à leur véritable compréhension.

Une autre approche existe, rarement employée dans la médiation scientifique, et plus rarement encore dans l'enseignement des sciences après l'école primaire : l'approche « phénoménologique ». Issue d'un vaste champ de la réflexion philosophique et inspirée de la démarche de clarification adoptée par les chercheurs des disciplines scientifiques émergentes, elle conduit à une démarche explicative originale fondée sur l'exploitation des connaissances « naïves » des apprenants, validée par de récentes recherches en sciences cognitives.

Peu performante sur le plan prédictif car non formalisée, et bien que fortement reliée à l'appréhension théorique des phénomènes, elle est en revanche riche d'un fabuleux pouvoir évocateur, propre à susciter une compréhension véritable.

En montrant comment une approche phénoménologique de l'univers permet de donner du sens à une expérience, à un fait ou à une relation scientifique sans nécessairement confronter l'apprenant aux concepts, lois et autres « formules » de la démarche habituelle, le présent article montre comment son emploi, par une articulation subtile avec les approches descriptive et formelle, est susceptible d'offrir à tous les publics des conditions d'apprentissage des sciences plus confortables et plus accessibles.

---

<sup>1</sup> Au sens pédagogique du terme.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	3
QUELQUES ELEMENTS D'HISTOIRE ET D'EPISTEMOLOGIE .....	4
<i>La genèse des disciplines scientifiques.....</i>	<i>4</i>
<i>Qu'est-ce qu'un « modèle » scientifique ? .....</i>	<i>5</i>
L'APPROCHE THEORIQUE FORMELLE.....	7
<i>Le risque de confusion entre modèle et réalité .....</i>	<i>8</i>
<i>Le risque d'une « a-compréhension » .....</i>	<i>9</i>
<i>Les limites de l'approche formelle en pédagogie .....</i>	<i>9</i>
QUELLES AUTRES VOIES POSSIBLES ?.....	10
<i>L'approche théorique descriptive.....</i>	<i>10</i>
<i>L'approche qualitative et ses variantes .....</i>	<i>10</i>
LES FONDEMENTS COGNITIFS ET DIDACTIQUES DE L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE.....	12
<i>Des sciences... « naïves » .....</i>	<i>12</i>
<i>Quelques idées complémentaires relatives à « l'apprendre » .....</i>	<i>13</i>
L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE.....	14
<i>Pourquoi « phénoménologique » ?.....</i>	<i>14</i>
<i>Une approche essentiellement empruntée aux disciplines émergentes .....</i>	<i>14</i>
<i>L'apport pédagogique de l'approche phénoménologique .....</i>	<i>14</i>
<i>Les caractéristiques de l'approche phénoménologique .....</i>	<i>16</i>
<i>Des désirs de généralisation.....</i>	<i>18</i>
L'ARTICULATION DES APPROCHES THEORIQUES DESCRIPTIVE, FORMELLE ET PHENOMENOLOGIQUE.....	19
CONCLUSION.....	21
BIBLIOGRAPHIE.....	22
ANNEXE : L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE EN PRATIQUE.....	23
<i>Premier exemple : Pourquoi le blanc d'œuf battu en neige est-il blanc ?.....</i>	<i>24</i>
<i>Deuxième exemple : Les deux planches.....</i>	<i>25</i>
<i>Troisième exemple : L'aimant dans le tube .....</i>	<i>26</i>

## INTRODUCTION

Le développement de la connaissance scientifique passe non seulement par l'observation et la description des phénomènes, mais aussi et surtout par leur rationalisation à travers des « théories » constituées de « modèles », représentations idéalisées du monde fondées sur des « concepts », eux-mêmes articulés par des « lois » plus ou moins mathématisées. Or un des problèmes fondamentaux de la vulgarisation de notions scientifiques complexes tient au fait que les scientifiques qui partagent leurs savoirs ne prennent souvent pas conscience de l'importance de dissocier l'approche descriptive et qualitative des comportements de la nature, des modèles, concepts et lois qui les explicitent.

On a pu ainsi entendre dans telle fête de science, sur le stand de chimistes tentant valeureusement de rendre leur passion communicative, une explication de la « baisse de la température de fusion de la glace lorsqu'on y met du sel » faisant appel aux « potentiels chimiques des phases liquide et solide de l'eau ». Dans le même ordre d'idées, dans tous les musées scientifiques ou presque, il est possible d'admirer tantôt une balle de ping-pong, tantôt un ballon de baudruche « léviter » dans le flux d'air d'un sèche-cheveux ou d'une soufflerie... l'explication invoquée faisant systématiquement appel au fameux « théorème de Bernoulli », d'emploi si aisé mais d'interprétation (et de compréhension) si délicate. Ne parlons pas de la célèbre « expérience de Galilée », en général explicitée par une reformulation plus ou moins habile du « principe fondamental de la dynamique », ni même de l'expression de l'énergie cinétique d'un point matériel non relativiste, dont de très rares scientifiques seulement sont capables de justifier la dépendance en le carré de la vitesse.

Le problème vient du fait que tout scientifique a acquis une connaissance des concepts abstraits et des modèles telle, qu'il lui est tout naturel d'y faire appel, non seulement pour rendre compte d'un phénomène, mais également pour l'expliquer. Et bien nombreux sont ceux qui finissent par confondre réalité et modèles explicatifs, comme le déplorait Richard Feynman, Prix Nobel de physique 1965, dans une conférence prononcée en 1966 devant des enseignants de sciences. Citant en exemple un manuel de 6<sup>ème</sup> [1] : « [...] dès la première leçon, les choses sont mal engagées car l'auteur part d'une idée fautive de ce qu'est la science » qui affirmait que « C'est l'énergie qui fait marcher le chien, la moto, etc. », il écrivait alors :

*« Il est très mauvais, je pense, que la première leçon n'apporte en réponse à une question qu'une formule cabalistique. Le manuel que je cite contient d'autres formules du genre : « C'est la gravité qui fait tomber les corps » ou « Les semelles des chaussures s'usent à cause du frottement ». Si le cuir des chaussures s'use, c'est parce que les aspérités et les inégalités du trottoir accrochent le cuir et en arrachent des parcelles. Dire seulement que c'est par l'effet du frottement, ce n'est pas de la science et c'est un peu triste ».*

Certains vulgarisateurs pourtant, échappent à cet écueil : les plus aguerris d'une part, comme justement Richard Feynman dans ses nombreux ouvrages, le conférencier et auteur Hervé This<sup>2</sup> ou le journaliste Jérôme Bonaldi dans ses séquences vidéo très réussies « *Comment ça marche ?* »<sup>3</sup> ; mais également ceux qui exposent les résultats de sciences expérimentales neuves telles que la physique des milieux granulaires, dont les concepts et formalismes n'ont pas encore été forgés. Ils emploient alors une approche dite « phénoménologique », fondée sur l'observation, le bon sens, la mise en relation, l'analogie...

Les pages qui suivent proposent une caractérisation de cette approche particulière au regard des différences qu'elle présente avec le traitement traditionnellement formalisé et abstrait de la médiation des connaissances scientifiques<sup>4</sup>. Nous commencerons par définir la notion de « modèle scientifique », pour montrer les limites de l'approche explicative formelle correspondante, aussi bien en vulgarisation scientifique que dans l'enseignement des sciences. Nous proposerons alors une généralisation et une rationalisation de l'approche phénoménologique, non sans expliciter la place qui peut être la sienne au sein de la médiation scientifique, grâce à un modèle précisant ses articulations avec les deux autres approches classiques. Enfin, le traitement commenté de quelques phénomènes, et même d'expressions mathématiques bien connues, nous permettra d'illustrer par l'exemple la portée explicative et les limites de cette approche.

<sup>2</sup> Parmi ses nombreux ouvrages de gastronomie moléculaire, consulter notamment la référence [2].

<sup>3</sup> Une cassette VHS et un ouvrage des meilleures séquences ont été publiés (références [3] et [4]).

<sup>4</sup> Par « médiation », nous entendons aussi bien la vulgarisation scientifique que l'enseignement des sciences ; de même, « l'apprenant » désignera indifféremment tout individu en situation d'apprentissage des sciences (que nous désignerons parfois par le terme général de « spectateur de science »).

## QUELQUES ELEMENTS D'HISTOIRE ET D'EPISTEMOLOGIE

### *La genèse des disciplines scientifiques*

Les diverses disciplines qui constituent aujourd'hui ce que l'on nomme la « science moderne » ne sont pas apparues aux mêmes moments de l'histoire mais au contraire, pour la plupart, les unes après les autres, sous forme d'« excroissances » du corps des connaissances dont disposaient alors les hommes de science. Ces naissances ne se sont certes pas faites par hasard mais suite à la réalisation de séries d'observations nouvelles permises par l'émergence de nouveaux outils d'investigation d'une part (nouvelles théories, appareils de mesure, moyens financiers, etc.), de préoccupations sociales, économiques, culturelles et environnementales inédites d'autre part et enfin, dans certains cas, par le biais de véritables changements de paradigmes<sup>5</sup> nécessités par une accumulation de faits contradictoires avec les théories existantes, ouvrant eux-mêmes les esprits à de nouvelles quêtes de connaissances<sup>6</sup>.

Ainsi en 1847 Louis Pasteur<sup>7</sup>, étudiant en thèse à l'Ecole normale supérieure dans un laboratoire de cristallographie, une discipline alors en pleine expansion, découvrit la propriété de certains cristaux<sup>8</sup> de n'être pas superposables à leurs images dans un miroir ; puis il réussit à corréliser cette constatation avec leurs propriétés optiques particulières, identifiées trente ans plus tôt par le physicien J.-B. Biot. Cette découverte devait réorienter toutes ses recherches et être à l'origine d'une nouvelle branche de la chimie, la stéréochimie, et conduire un siècle plus tard à l'immense champ de la synthèse asymétrique. Etudiant ensuite la capacité de certains micro-organismes à différencier les deux formes d'acide tartrique qu'il avait découvertes, il réorienta à nouveau ses recherches, vers l'étude de la fermentation cette fois, en tant que phénomène chimique et biologique. De ces travaux devaient naître de nouvelles sciences comme la microbiologie et dans les années 1880, la biochimie.

De nos jours et peut-être plus que jamais, les inexorables avancées des recherches scientifiques continuent à susciter de nouvelles interrogations, de nouvelles préoccupations et par suite, à ouvrir la voie à de nouvelles disciplines. La physique des milieux granulaires par exemple (ou *physique des tas de sable*, si l'on préfère), constitue un très bon exemple de ce type de naissance. Il n'y a en effet que peu de temps que certains physiciens issus des disciplines « traditionnelles » comme la mécanique du solide et la mécanique des fluides, ou plus modernes telles que la physique de la « matière molle », s'interrogent sur la forme et le déplacement des dunes, la formation des rides sous-marines, la vitesse d'écoulement du sable dans les sabliers, etc. A la clef : la possible maîtrise des problèmes d'ensablement de pays comme la Mauritanie ou la Chine, l'utilisation industrielle des « lits fluidisés » dans la formulation<sup>9</sup> des substances en poudres, voire l'explication de phénomènes plus poétiques, tels que le « chant des dunes »<sup>10</sup>.

Or dans ces phases de démarrage, les scientifiques ne disposent guère d'autres moyens de description que leurs mots et concepts de tous les jours : logique et langage courant d'une part, termes et lois empruntés aux disciplines déjà existantes d'autre part. Et bien vite, ces outils deviennent insuffisants pour décrire des phénomènes qui, n'ayant jamais été observés, n'ont a fortiori jamais été décrits. C'est alors que commence une phase de passage à l'abstraction que l'on nomme « modélisation », dont l'objectif est de se doter d'outils de langage et de raisonnement susceptibles de rendre compte aussi parfaitement et simplement que possible des nouveaux phénomènes observés, c'est-à-dire de construire une sorte de « modèle » de la réalité<sup>11</sup>. Car en effet dans la plupart des cas, l'élaboration d'une discipline qui soit à la fois descriptive et prédictive nécessite une véritable reconstitution intellectuelle du sujet d'étude, c'est-à-dire une construction cohérente d'une série de concepts<sup>12</sup>, articulés par des comportements bien identifiés.

---

<sup>5</sup> Calcul en base 10, monogamie, croissance économique, découpage des harmonies musicales en douze demi-tons... Les paradigmes sont les fondements culturels de la pensée d'un groupe humain. A l'évocation du concept de paradigme, on ne peut que citer le célèbre ouvrage de Kuhn, rappelé dans la référence [5].

<sup>6</sup> Certaines disciplines comme la physique quantique et la théorie de la relativité générale ont certes pu apparaître à partir de constructions très abstraites, mais c'est tout de même par l'observation de faits, naturels ou provoqués par les chercheurs, qu'elles ont débuté.

<sup>7</sup> Lire par exemple à ce sujet la référence [6].

<sup>8</sup> Il s'agissait des cristaux des formes lévogyre et dextrogyre de l'acide tartrique, que l'on trouve notamment dans les dépôts du vin blanc.

<sup>9</sup> La formulation d'une substance est la manière dont elle est conditionnée pour répondre à un besoin industriel ou domestique.

<sup>10</sup> Ce chant est un son relativement puissant que l'on peut entendre lorsque le sable s'écoule le long de certaines dunes. On peut également l'entendre en dévalant une dune en courant ou en glissant. La référence [7] offre une interprétation excellente de ce phénomène fascinant.

<sup>11</sup> Parce qu'il procure une vision simplifiée et idéalisée du monde, ce terme est à considérer davantage au sens qu'il a dans « modèle réduit » ou « top model » qu'au sens d'un « modèle à suivre ».

<sup>12</sup> Temps, entropie, vecteur, chromosome, espèce, mémoire... Un concept scientifique est un terme associé à un objet, une idée ou une propriété de la nature ou de l'univers.

## Qu'est-ce qu'un « modèle » scientifique<sup>13</sup> ?

Pour être quantitative et réellement opératoire en termes d'applications, cette modélisation se doit en outre d'être en même temps mathématisée. D'où la nécessité pour les scientifiques de procéder à la définition de concepts abstraits et de formalismes rigoureux, c'est-à-dire d'extraire du monde tangible les propriétés de l'univers les plus pertinentes et de les réduire à des objets mathématiques, dotés d'unités, de symboles et de propriétés idéalisées. Idéalisées car bien entendu selon cette approche, il serait illusoire de vouloir décrire l'intégralité des propriétés de l'objet étudié. Au contraire ! Le niveau de complexité qu'il faudrait alors atteindre rendrait inextricable leur modélisation.

C'est pour cette raison que le choix des concepts et paramètres principaux est une étape délicate de la modélisation. Dans l'étude de la chute des corps dans un champ de pesanteur, par exemple (cf. également l'encadré ci-dessous), lors du choix arbitraire de la force à considérer en priorité, choisira-t-on de retenir le poids des objets où la force de frottement exercée sur eux par l'air ? Et par suite, leur masse ou leur surface ? Pour diverses raisons (plus ou moins légitimes selon les cas), c'est le premier choix qui a été retenu par les physiciens, de sorte que dans la reconstitution abstraite de la chute d'un objet, on considérera qu'il est « avant tout » soumis à l'action de son poids. Par suite, c'est sur cette base que l'on décrira son mouvement. Dans cette approche, la force de frottement exercée par l'air sera considérée comme exerçant une petite perturbation au mouvement, ou sera dans la plupart des cas négligée.

Or ce point est fondamental. En effet il impose, à côté de la définition des concepts et des lois décrivant l'univers, la nécessité d'en préciser les domaines d'application. Et en ce qui concerne l'exemple de la chute des corps évoqué ci-dessus, il va de soi que le comportement « objet soumis uniquement à son poids » ne sera valable que pour les objets lourds de faible portance<sup>14</sup>.

### Le modèle de la « chute des corps »<sup>15</sup>

#### *Première phase : observation*

Munissons-nous d'un objet sphérique tel qu'une balle de tennis et lâchons-le depuis une hauteur d'environ 2 m, sans ne lui imprimer aucune vitesse initiale. Pour peu que son mouvement puisse être mesuré avec précision (toise, chronomètre, enregistrement vidéo ou cellules photoélectrique), on observe le comportement suivant :

- \* la balle tombe ;
- \* son mouvement est rectiligne et vertical ;
- \* sa vitesse augmente au cours de sa chute.

#### *Deuxième phase : identification des propriétés et paramètres susceptibles d'intervenir dans le mouvement*

Il convient à présent d'identifier les paramètres importants. Parmi une foule de propriétés de l'objet d'étude (dont par exemple la température ou la pression de l'air à l'intérieur de la balle), ceux qui paraissent importants sont :

- \* la propriété de cet objet à être attiré par la Terre ;
- \* la difficulté qu'il y a à mettre cet objet en mouvement ;
- \* la taille de la balle ;
- \* la capacité de l'air à en freiner le mouvement.

De même la vitesse et son augmentation constituent des paramètres à prendre en compte (on considère ici que la notion de vitesse est un concept connu).

#### *Troisième phase : conceptualisation*

On décide alors de caractériser respectivement les propriétés décrites ci-dessus de la façon suivante :

- \* poids de la balle ;
- \* masse d'inertie de la balle ;
- \* surface de la balle ;
- \* viscosité de l'air.

On suppose que l'on dispose d'un dynamomètre, petit appareil utilisé pour mesurer l'intensité des forces. On nomme « accélération » la variation temporelle de la vitesse de la balle.

<sup>13</sup> Voir également à ce sujet et pour compléter l'ensemble des deux premières parties de l'article, l'excellente référence [8].

<sup>14</sup> La « portance » d'un objet est sa capacité à s'appuyer sur l'air.

<sup>15</sup> Cet encadré décrit de manière la façon dont un modèle scientifique se construit mais de manière très idéalisée et donc non réaliste. Certains raccourcis permettent d'éviter les longueurs inutiles.

#### *Quatrième phase : formalisation*

On décide ensuite de formaliser les propriétés ci-dessus de la façon suivante (on suppose connues la notion mathématique de « vecteur » et le concept physique de « force ») :

- \* poids de la balle : vecteur  $\mathbf{P}$  ;
- \* masse d'inertie de la balle :  $m$  (en kg) ;
- \* surface de la balle :  $S$  (en  $m^2$ ) ;
- \* viscosité de l'air :  $\eta$ .

La vectorisation de  $\mathbf{P}$  est introduite pour représenter la propriété de la chute d'être toujours orientée selon une direction que l'on nomme « verticale ». De même on introduit les vecteurs  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{a}$  pour représenter la vitesse et l'accélération de la balle.

#### *Cinquième phase : principe fondamental de la dynamique*

Cette loi énoncée par Newton stipule qu'un solide de masse d'inertie  $m$  soumis à un ensemble de forces  $\Sigma \mathbf{f}$  subit une accélération  $\mathbf{a}$  telle que :  $\Sigma \mathbf{f} = m \cdot \mathbf{a}$

Il est nécessaire d'y faire appel pour pouvoir modéliser le problème de la chute des corps.

#### *Sixième phase : modélisation*

Dans les conditions usuelles de ce type d'expérimentation, la relation mathématique entre le freinage dû à l'air et les paramètres  $S$  et  $\eta$  est très difficile à établir. D'autant plus que l'état de surface de la balle (dont nous avons éludé le possible effet ici) est particulièrement délicat à caractériser. En première approximation, on décide donc de négliger l'effet de freinage ou plus précisément, de n'étudier le phénomène que dans le cas où il est négligeable. Cette étape constitue la définition du domaine de validité du modèle que l'on est en train de construire.

On rassemble alors les résultats énoncés afin de dégager une loi qui mette en œuvre les différents paramètres introduits. Dans notre modèle de la chute des corps, la seule force s'exerçant sur la balle étant à présent son poids, on parvient à la relation :  $\mathbf{P} = m \cdot \mathbf{a}$  ou  $\mathbf{a} = \mathbf{P} / m$

On arrive ainsi à l'idée que lors de la chute d'un corps, l'accélération ( $\mathbf{a}$ ) de ce corps augmente avec l'attraction qu'il subit de la part de la Terre ( $\mathbf{P}$ ) et diminue avec la difficulté qu'il y a à le mettre en mouvement ( $m$ ). Mais si ces deux effets étaient visibles qualitativement, ils sont à présent formalisés et pour ainsi dire « figés » dans une relation mathématique.

#### *Septième phase : limites du modèle*

Bien évidemment, pour obtenir un modèle simple, il a fallu négliger l'effet de « résistance » qu'offre l'air lors de la chute. Et en effet si l'expérience est réitérée avec une plume et non plus une balle de tennis, si la balle de tennis est lâchée du haut d'une tour et non plus d'une hauteur de 2 m, si une pierre est lâchée dans l'eau et non plus dans l'air, on constate que l'accélération n'est plus uniforme et que l'objet atteint une vitesse limite après un certain temps.

Un autre modèle, plus précis mais plus complexe, doit donc être construit pour rendre compte de la « chute des corps dans les fluides visqueux ».

Ainsi par le processus intellectuel de la « modélisation » naît le modèle : un monde nouveau, souvent abstrait et formel<sup>16</sup>, où grâce au choix pertinent des concepts inventés pour le simuler, les comportements du monde réel sont traduits en « relations » ou en « lois » au sein de « théories ». En l'occurrence, pour le cas qui nous concerne, le modèle construit sur la base de l'approximation de la chute libre (sans frottements) nous a permis, sous ces conditions particulières, d'affirmer que « les objets pesants tombent dans un champ de pesanteur en suivant un mouvement rectiligne et uniformément accéléré ».

Ce monde nouveau ressemble certes au monde réel ; mais parce que les scientifiques n'y ont introduit que les paramètres les plus fondamentaux en négligeant les petits effets de moindre importance, il se comporte de manière beaucoup plus simple. Par suite, il n'est applicable que dans un domaine d'approximation bien défini, dont il est nécessaire d'avoir conscience en permanence. C'est par la prise de conscience de cette différence fondamentale, par ce savoir épistémologique ou « savoir sur le savoir scientifique », que l'élève peut réellement comprendre ce qu'est un modèle et l'utiliser alors de manière pertinente.

<sup>16</sup> Mais pas uniquement. On peut en effet concevoir des modèles expérimentaux (les physiciens des grains modélisent la formation des dunes du désert en plaçant le sable dans l'eau, ce qui permet de réduire la taille des dunes formées à l'échelle du laboratoire), schématiques (modèle de la Terre en couches concentriques des géologues), matériels (mappemonde et modèles moléculaires des chimistes), informatiques (modèles météorologiques), métaphoriques (métaphore (fausse) de l'Amazonie, poumon de la planète), etc.

## L'APPROCHE THEORIQUE FORMELLE

Nous l'avons évoqué plus haut : pour devenir prédictive et opérationnelle, une discipline scientifique a besoin de s'entourer de concepts, de modèles, de formalismes et d'abstraction. Puis, lorsqu'elle a suffisamment mûri et que les théories qu'elle a développées ont donné suffisamment de preuves de leur pertinence<sup>17</sup> et de leur importance dans les domaines intellectuel, industriel, social ou environnemental, elle est validée par la communauté scientifique, introduite dans les découpages disciplinaires des instituts de recherche, voire dans l'enseignement, à des niveaux scolaires qui dépendent des prérequis qu'elle nécessite et des niveaux de formulation auxquels il est possible de l'adapter.

A ce stade de maturation, elle a déjà dépassé de nombreux stades de formalisation et, enseignée « en l'état », elle nécessite d'apprendre à utiliser l'ensemble des outils de langage, de raisonnement et de représentation que sont les concepts, les lois et les formalismes imaginés par les scientifiques de cette discipline. C'est sur cette base qu'ils peuvent invoquer ses théories pour expliciter et prédire les phénomènes particuliers qui lui sont rattachés.

Bien plus : si elle est bien intégrée, cette approche peut même s'avérer (en apparence du moins) satisfaisante sur le plan explicatif, et ne rien nécessiter d'autre pour que scientifiques, étudiants et autres spectateurs de science soient convaincus de la réalité du résultat qui apparaît progressivement sous leurs yeux ; on peut alors parler « d'explication formelle », dont un exemple est présenté ci-dessous.

### Approche théorique formelle de l'expérience de Galilée<sup>18</sup>

#### *Première phase : observation*

L'expérience (soi-disant initialement réalisée par Galilée du haut de la tour de Pise avec des billes de différentes tailles et de différentes masses<sup>19</sup>) consiste à lâcher deux balles, une balle de tennis et une boule de pétanque par exemple, d'une hauteur de 2 m environ et à observer leur comportement. Dans ces conditions, on observe que les deux balles adoptent le même mouvement et arrivent au sol en même temps.

#### *Deuxième phase : interprétation*

Sachant que l'approximation de la chute des corps dans les fluides non visqueux est licite dans ces conditions expérimentales, nous utiliserons le modèle développé dans le paragraphe précédent. A cette fin, nous noterons  $m$  et  $m'$  les masses (d'inertie) respectives des deux objets,  $P$  et  $P'$  leurs poids respectifs,  $a$  et  $a'$  leurs accélérations respectives.

Appliquons aux deux balles la loi dégagée dans notre modèle :  $P = m \cdot a$  et  $P' = m' \cdot a'$

Par ailleurs, un autre modèle, celui de la « gravitation universelle » développé par Newton, indique que le poids d'un objet est proportionnel à une de ses propriétés intrinsèques, sa masse gravitationnelle, dont la grandeur est la même que celle de sa masse d'inertie<sup>20</sup>. Ce modèle permet même la formalisation de cette propriété et montre que :  $P = m \cdot g$  (et  $P' = m' \cdot g$ ) où  $g$  est un vecteur caractéristique de l'attraction terrestre.

Ainsi en combinant les deux relations pour chacune des balles, il apparaît que :  $m \cdot g = m \cdot a$  et  $m' \cdot g = m' \cdot a'$

Et en simplifiant les deux expressions par  $m$  et  $m'$ , il vient :  $a = g = a'$

#### *Troisième phase : conclusion*

Dans le cadre des approximations liées aux modèles utilisés, les deux balles sont soumises à la même accélération, égale à  $g$  (que l'on nomme aussi par suite « accélération de la pesanteur »).

Ainsi grâce à une approche théorique utilisant le modèle de la chute des corps élaboré dans le paragraphe précédent et le modèle de la gravitation universelle, il a été possible de rendre compte de la chute des deux balles.

<sup>17</sup> On pourrait citer ici Carl Popper, dont la notion de « falsifiabilité » est l'un des critères de scientificité les plus puissants qui soient, mais il s'agit d'un critère essentiellement intellectuel, qui s'applique plus mal aux situations réelles qu'à l'analyse épistémologique des théories scientifiques.

<sup>18</sup> Cette interprétation se place dans le cadre de l'approximation de la chute des corps dans les fluides non visqueux. L'approximation est valable expérimentalement si l'on utilise par exemple deux balles de masses supérieures à la cinquantaine de grammes et qu'on les lâche d'une hauteur de 2 m environ.

<sup>19</sup> Dans ce cas précis, l'approximation n'est pas licite et l'histoire nous ment sans aucun doute. Il est d'ailleurs probable que Galilée n'ait jamais réalisé cette expérience depuis la Tour de Pise...

<sup>20</sup> Pour cette raison, nous ne parlerons plus que de « masse » dans la suite. Notons que la présence de la même « masse » dans cette relation que dans le principe fondamental de la dynamique est hautement non triviale et qu'à notre niveau, nous pouvons la considérer comme extraordinaire !

## *Le risque de confusion entre modèle et réalité*

C'est cette approche formelle qui fournit le cadre général de l'enseignement actuel des sciences et inspire la plupart des pratiques de vulgarisation des connaissances scientifiques. Pourtant, comme le montrent nombre d'évaluations en didactique des sciences, elle n'est pas dénuée de dangers et d'écueils. A l'origine de bien des blocages, elle peut pour commencer être à l'origine de la construction d'une vision inexacte de la science et du monde, par les vulgarisateurs et les enseignants eux-mêmes. Pourquoi ? Parce qu'elle présente trois caractéristiques essentielles qui sont souvent oubliées :

- un « concept » est un outil descriptif avant d'être un objet naturel (force, orbitale...);
- une « loi » est souvent approximative et ne s'applique que dans des conditions particulières (loi de Hooke, loi d'action des masses...);
- un « modèle » est une représentation théorisée et idéalisée du monde réel (modèle atomique de Bohr, modèle de la goutte d'eau sphérique...).

Or souvent, dans l'esprit de bien des enseignants et autres médiateurs des sciences, les lois semblent prévaloir sur les propriétés de la nature alors qu'elles n'en constituent que des modélisations approchées, des tentatives d'explicitation dans des domaines d'application plus ou moins restreints. N'entend-on pas souvent parler des « lois physiques qui régissent l'univers » ? Cette confusion entre « modèle » et « réalité » conduit à une perception de la science dogmatique, figée et inaccessible, qui se prolonge en une vision idéalisée du monde lui-même.

Par suite, présenter la science et se risquer à expliciter le monde selon une telle approche implique à la fois :

- d'accompagner les élèves et spectateurs de science dans la construction intellectuelle des outils théoriques formels au travers d'une approche aussi progressive que possible, en leur montrant qu'ils n'ont pas été imaginés au hasard, mais bien en vue d'une utilisation précise dans le cadre d'une reconstitution abstraite de la réalité ;
- de leur laisser le temps d'assimiler ces outils qui, en tant qu'objets intellectuels nouveaux et parfois déconnectés du monde tangible, nécessitent une maturation certaine avant de pouvoir être mobilisés efficacement ;
- de montrer les limites de l'utilisation qui est faite du modèle pour rendre compte de la réalité, afin d'éviter la dangereuse confusion entre ce même modèle et la réalité.

Aussi le recours à la démarche explicative formelle, surtout si elle est présentée comme une forme d'explication (nous y reviendrons), implique-t-elle obligatoirement l'introduction aussi précoce que possible de la notion de « modèle » scientifique, tel que nous l'avons décrit ci-dessus. La notion de « simulation » numérique, quant à elle, doit être présentée comme une reconstitution virtuelle et calculatoire du monde, elle aussi fondée sur un modèle, une reproduction mathématisée ou informatisée d'un phénomène à partir de lois fondamentales et de conditions initiales appropriées, et non pas comme une reconstitution d'observations réelles effectuées sur le terrain (même si elle s'en nourrit souvent).

C'est à ce prix que le médiateur scientifique pourra espérer atteindre le difficile objectif de faire lentement passer auprès de ses interlocuteurs les contenus théoriques de la science moderne. Néanmoins, malgré toute sa bonne volonté, il risque bien de se retrouver face à de grandes difficultés : blocage vis-à-vis des formalismes mathématiques, problèmes d'assimilation des outils théoriques, difficultés de familiarisation avec un monde abstrait où l'intuition et l'habitude ne sont plus nécessairement opératoires, difficultés liées au passage incessant du monde réel à celui de l'abstraction<sup>21</sup>, voire du passage d'un modèle à l'autre au sein d'un même discours<sup>22</sup>...

Autant d'obstacles inévitables qui perturbent la compréhension du spectateur de science ou de l'élève, surtout si ce dernier est en situation d'échec, ponctuel ou généralisé.

---

<sup>21</sup> Ainsi à la question : « Pourquoi les carottes sont-elles oranges ? », le scientifique répondra souvent en termes de niveaux d'énergie dans les polyènes, dont le carotène, responsable de cette couleur, est un représentant. Pour lui, le lien semble direct ; mais combien de passerelles entre le monde réel et le monde conceptuel emprunte-t-il en même temps pour faire ce lien ? En tout état de cause, trop pour l'élève qui vient seulement d'apprendre à identifier les polyènes.

<sup>22</sup> La juxtaposition dans un même cours du modèle de Bohr et du modèle quantique de l'atome par exemple, pourra poser d'énormes problèmes de compréhension si l'enseignant ne prend pas la peine de s'attarder sur le fait que dans le premier modèle, les électrons qui possèdent l'énergie potentielle la plus élevée sont les plus éloignés du noyau, alors que ce n'est absolument pas le cas dans le second modèle.



## ***Le risque d'une « a-compréhension »***

Second obstacle pour le professionnel de la science, rompu à l'utilisation de ses théories : leur conférer un pouvoir explicatif illégitime. Car avoir suivi la logique et avoir conscience de la cohérence d'une suite d'équations est-il suffisant pour ressentir cette « expérience de signification » chère à John Dewey [9], l'impression d'être désormais capable de « ressentir » le phénomène, la conviction que le résultat obtenu ne pourrait être différent ?

Qui s'est un jour livré à la pratique de la thermodynamique classique ou à celle de l'électrochimie, dont les calculs impénétrables nécessitent l'emploi de transformations mathématiques directes, puis inverses à l'issue de la démonstration, pour pouvoir être entrepris, a au contraire déjà éprouvé la bizarre sensation que procure un résultat final dont on est sûr mais qu'on ne comprend pas.

Plus que d'une non-compréhension, il s'agit d'ailleurs plutôt là d'une « a-compréhension », parfaitement exprimée par Richard Feynman lors de la conférence déjà citée plus haut [1] alors qu'il rapporte un de ses souvenirs d'enfance :

*« [...] un beau jour, dans l'un de ces manuels, je suis tombé sur la formule qui donne la fréquence propre d'un circuit oscillant :  $f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$ , où  $L$  est l'inductance du circuit et  $C$  sa capacité. Mais pi ? De quel cercle s'agissait-il ? [...] Ceux qui rient pourraient-ils me dire pourquoi pi intervient ici ? Il faut réfléchir, me dis-je. »*

Et plus loin : *« Aujourd'hui, je comprends mieux toutes ces questions, mais, au fond de moi, je ne sais toujours pas très bien de quel cercle il s'agit, ni d'où vient le pi. »*

L'affirmation paraîtra hardie, voire douteuse, à bien des lecteurs, mais force est de constater qu'il est une caractéristique des théories qui n'est jamais prise en compte lorsqu'il s'agit de les enseigner ou de les vulgariser : elles sont conçues pour expliciter, rationaliser, représenter et agir sur le monde, mais pas pour « l'expliquer » et le rendre intelligible, dans le sens le plus profond du terme (et même si elles le font parfois, ou du moins donnent l'illusion de le faire).

## ***Les limites de l'approche formelle en pédagogie***

Ainsi, parce qu'elle nécessite de nombreux prérequis et l'assimilation de bases scientifiques abstraites, mais aussi et surtout parce que son pouvoir explicatif est limité pour le profane, l'approche explicative formelle est peu adaptée à la vulgarisation des connaissances scientifiques qui, contrairement à l'enseignement, ne vise jamais à l'acquisition de compétences scientifiques professionnelles et n'ont donc pas à enseigner la genèse des théories en plus de l'objectif, déjà ambitieux en soi, d'enseigner la « compréhension du monde ».

Mais son usage strict défavorise également l'élève qui, pour une raison ou une autre, a manqué le ou les cours dans lesquels étaient introduits les concepts de base nécessaires à la compréhension du modèle employé, voire celui qui, pour des raisons familiales ou de santé, a accumulé un retard d'une ou plusieurs années scolaires. Et sans aller aussi loin, l'élève simplement distrait risque fort de ne pas tirer grand profit du cours si par mégarde il manque une définition ou une étape du raisonnement. A moins que ce soit un élève consciencieux qui le soir venu, reprendra ses notes et ses livres pour combler ses lacunes...

En d'autres termes, l'approche formelle exclusive permet difficilement de remonter dans le train de l'apprentissage des sciences une fois que l'on en est tombé, même si c'est juste à côté...

### **Pour résumer...**

L'approche traditionnelle de l'enseignement et de la médiation scientifiques procède d'une vision théorique et mathématisée des phénomènes, qui fait appel à des modèles construits pour rendre compte de la réalité du mieux possible afin d'agir sur elle en retour, mais pas nécessairement pour « faire comprendre » cette réalité.

Ces modèles fonctionnent sur la base de simplifications qu'il est nécessaire d'avoir à l'esprit lors de leur emploi, et dans le cadre desquelles l'approche formelle est prédictive et peut parfois apparaître explicative.

La maîtrise d'un modèle scientifique s'acquiert progressivement. Son enseignement repose sur des prérequis, un enchaînement de définitions, de mises en relation, une assimilation lente des lois établies et de leurs conditions d'application, la prise de notes, le travail personnel et de multiples exercices d'application.

C'est pourquoi l'approche théorique formelle est peu adaptée à la pratique de la vulgarisation scientifique et, sous sa forme exclusive, mal adaptée à l'enseignement des sciences lui-même.

## QUELLES AUTRES VOIES POSSIBLES ?

Si du point de vue épistémologique, il est indéniable que les théories scientifiques contribuent à « expliquer le monde » (et même si en l'occurrence nous préférons l'emploi du terme « explicitation » à celui « d'explication »), la question fondamentale qui vient d'émerger de notre réflexion est cette fois celle de leur *pouvoir explicatif pédagogique*. Quelles possibilités s'offrent alors désormais au pédagogue qui, conscient de ces limites, souhaite partager avec ses interlocuteurs la merveilleuse intelligibilité du monde qu'il a découverte ?

### *L'approche théorique descriptive*

Elle est à la base de toute construction théorique, dans la mesure où il est illusoire de chercher à construire des concepts et des lois représentatifs de situations non ou mal observées. Qu'en est-il de son pouvoir explicatif ?

Il nous revient évidemment immédiatement à l'esprit les « leçons de choses » de nos grands-parents. Car observer, noter, classer, tester la reproductibilité de ces observations, classer, catégoriser, c'est déjà un peu « comprendre ». Aussi ne résistons-nous pas ici à évoquer à nouveau Richard Feynman, toujours lors de la même conférence [1] :

*« Au lieu de se contenter de m'indiquer leur nom, mon père disait par exemple : « As-tu remarqué que les oiseaux sont toujours en train de fouiller dans leurs plumes avec leur bec ? Regarde cet oiseau comme il farfouille dans ses plumes. Pourquoi à ton avis ? » Je tentai une réponse : « C'est parce que ses plumes sont ébouriffées et qu'il essaye de les lisser. – Peut-être, me dit-il, mais quand ses plumes sont-elles ébouriffées, et pourquoi ? – Quand il vole, dis-je ; quand il marche au sol tout va bien, mais quand il vole, ses plumes s'ébouriffent. – Alors, me répondit-il, l'oiseau devrait fouiller dans ses plumes plus souvent juste après s'être posé, qu'après avoir simplement marché. Eh bien, regardons si c'est vrai ». Nous nous mîmes donc en observation. [...] »*

Plus récemment, notons de même que l'émergence de certaines formes de médiation scientifique ont remis cette approche au goût du jour. Ainsi, il n'est pas rare qu'au « théâtre de sciences », la dimension purement explicative soit reléguée au profit d'une dimension simplement démonstrative. Le clown *Ursule FaBulle*, par exemple, dans le spectacle créé en 2006 par *Les Atomes Crochus* [10], ne prend jamais la peine d'interpréter à l'aide de l'arsenal théorique de la chimie les expériences qu'il réalise. En revanche, le scénario a été conçu pour que tout spectateur attentif n'ait aucun doute sur la nature des substances utilisées et la manière dont le clown les manipule (figure 1). C'est ainsi que les enfants apprennent et comprennent que, lorsqu'il est réduit en poudre, le fer peut brûler...



Figure 1 : Ursule FaBulle – *La Science Infuse*

Notre objectif n'est pas ici de faire l'apologie de l'observation et de la description, d'autres l'ont fait mieux que nous et ont également su en tirer des applications pédagogiques, le mouvement initié par *La Main à la Pâte* fondant par exemple et notamment ses principes sur ceux des leçons de Marie Curie (1906, [11]). Il nous semble toutefois nécessaire de ne pas oublier cette dimension fondamentale de la construction d'une compréhension scientifique du monde, qu'elle passe par l'explicitation des théories ou par toute autre voie pédagogique. Cela permettra peut-être à nos élèves des difficultés pourtant simple à surmonter, telles qu'en a expérimentées, en séance de travaux pratiques, ce candidat au concours de l'une des deux plus « Grandes Ecoles » françaises, « collés » par l'un des auteurs parce qu'incapable de décrire ce qui se passait dans le Becher qu'il avait devant lui et hasardant, au vu des bulles qui s'échappaient du fond du récipient : « Il y a de l'oxygène ? ». Que ce fût de l'hydrogène n'avait bien entendu aucune importance ; ce que l'on attendait, c'était simplement l'indication de la présence des bulles...

### *L'approche qualitative et ses variantes*

Lorsque les difficultés de l'approche formelle se font trop rudes, les scientifiques savent toutefois inventer des voies simplifiées, qu'on dit « qualitatives », « mathématiques », « géométriques » ou encore, pour ce qui concerne la plus étonnante de toutes, « dimensionnelle ». L'encadré qui suit en donne quelques exemples, sur le thème de l'expression de l'énergie cinétique d'un objet non relativiste en mouvement.

## Approches « non formelles » de l'énergie cinétique

L'objectif des paragraphes qui suivent est d'illustrer, à travers le même exemple de l'expression de l'énergie cinétique (que nous chercherons à établir, puis éventuellement à comprendre), les différentes manières possibles d'aborder un même problème, habituellement traité très simplement de manière formelle.

L'approche formelle de cette question consiste en l'occurrence à « intégrer » l'expression du principe fondamentale de la dynamique, déjà évoqué plus haut, entre deux instants caractérisés par des états donnés (les caractères gras indiquent toujours des grandeurs vectorielles) :

$$\mathbf{f} = m \cdot \mathbf{a} \text{ s'écrit également : } \mathbf{f} = m \cdot d\mathbf{v}/dt \text{ ou } \mathbf{f} \cdot dt = m \cdot d\mathbf{v}$$

Par multiplication par  $\mathbf{v}$ , puis par intégration entre les états 1 et 2, on obtient :  $\int \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \cdot dt = \int m \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{v}$

On reconnaît alors, dans le premier membre de l'équation, l'expression du *travail* de la force appliquée à l'objet, qui en modifie le mouvement, cette quantité modifiant d'autant l'énergie potentielle de l'objet :

$$\int \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \cdot dt = W(\mathbf{f})_{1 \rightarrow 2} = E_{p2} - E_{p1}$$

Le second membre, quant à lui, représente la variation de ce que l'on nomme l'énergie cinétique de l'objet :

$$\int m \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{v} = \frac{1}{2} \cdot m v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m v_1^2 = E_{c2} - E_{c1}$$

Ainsi apparaît l'expression de l'énergie cinétique :  $E_c = \frac{1}{2} \cdot m v^2$

### Approche qualitative

C'est l'approche que l'on qualifie souvent de faite « avec les mains ». Elle est peu performante du point de vue prédictif mais permet, dans certains cas, d'explicitier partiellement un résultat formel. Dans notre cas d'étude, il suffira par exemple de dire que l'énergie cinétique d'un objet est « la quantité de chaleur qu'il libère lorsqu'il est arrêté, sans être déformé » (cette dernière condition est nécessaire pour éviter qu'une partie de son énergie cinétique soit transformée, non pas en chaleur, mais en énergie potentielle). Dès lors, on admettra assez facilement que cette énergie dépend de la masse de l'objet, ainsi que de sa vitesse. Mais cette approche ne fournira aucune indication sur le facteur  $\frac{1}{2}$ , pas plus que sur la présence de la puissance 2.

### Approche mathématique<sup>23</sup>

Cette puissance double est facile à expliciter si l'on considère, par exemple, qu'en inversant le sens de déplacement de l'objet (c'est-à-dire en inversant sa vitesse), l'expression de l'énergie cinétique de doit pas être modifiée : la puissance ne peut être que paire. En revanche, rien n'indique alors, si ce n'est un « principe d'économie » qui semble relativement bien s'appliquer aux lois physiques, qu'elle ne pourrait pas être quadruple, voire sextuple.

### Approche géométrique<sup>24</sup>

La vitesse  $\mathbf{v}$  d'un objet peut toujours s'exprimer comme la somme de deux vecteurs perpendiculaires  $\mathbf{v}_1$  et  $\mathbf{v}_2$  :  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$   
Or en vertu du « principe de conservation de l'énergie », les énergies cinétiques associées ne peuvent que vérifier la relation scalaire :  $E_c = E_{c1} + E_{c2}$   
Par suite, la seule manière de relier les deux expressions à l'aide d'une relation du type  $E_c = \alpha \cdot v^n$  est de fixer la valeur de  $n$  à 2.

### Approche dimensionnelle<sup>25</sup>

Nous cherchons une expression de l'énergie cinétique et, en vertu de l'approche qualitative décrite ci-dessus, savons qu'elle doit dépendre de la masse de l'objet et de sa vitesse. L'énergie cinétique s'exprime en Joules, la masse en kg et la vitesse en m/s. Or, parce que l'énergie potentielle d'un objet dans placé à l'altitude  $h$  dans un champ de pesanteur vaut  $E_p = mgh$ , nous savons que ces unités vérifient la relation :  $[J] = [kg] \times [m/s^2] \times [m] = [kg] \times [m/s]^2$   
Par suite, la seule et unique manière de relier ces grandeurs est de les réunir par une expression du type :  $E_c = \alpha \cdot v^2$

Que dire de ces approches si ce n'est qu'elles sont aussi admirables et utiles qu'elles soient, elles s'appuient toujours sur un principe, une autre expression, une reformulation de l'approche formelle ? Une frustration demeure, liée à la simple interrogation : « Pourquoi » ? C'est à cette frustration que nous voudrions tenter de répondre en introduisant un autre type d'approche non formelle : l'approche phénoménologique.

<sup>23</sup> Nous devons cette interprétation à Michel Peyrard, Professeur de physique à l'Ecole normale supérieure de Lyon.

<sup>24</sup> Nous devons cette interprétation à Antonin Marchand, doctorant en physique à l'Ecole normale supérieure (Paris).

<sup>25</sup> Nous devons cette méthode générale fascinante à Stéphane Fauve, Professeur de physique à l'Ecole normale supérieure (Paris).

*Des sciences... « naïves »*

Dans leur effort pour mieux comprendre le fonctionnement de l'esprit humain, les sciences cognitives ont défini la notion de « physique naïve » (et plus généralement de « sciences naïves »). Par là, elles désignent l'ensemble des connaissances susceptible d'être rattachées à une discipline scientifique donnée (physique mais également mathématiques, biologie ou même psychologie) mais acquises uniquement par l'expérience quotidienne, commune et profane. Ainsi, le jeune enfant découvre relativement tôt que les objets se déplacent spontanément vers le bas lorsqu'on les lâche, que les feuilles des arbres tombent en automne et qu'un sourire de leur maman est le signe de sa satisfaction.

Certains chercheurs, tels qu'Elisabeth Spelke [12], ont même montré qu'il existait chez les nourrissons des principes acquis de manière tellement précoce qu'ils pouvaient être qualifiés « d'innés ». Ainsi, dans l'expérience représentée à la figure 2 ci-dessous, où les barres noires représentent des caches derrière lesquels se déplacent les barreaux blancs de la position marquée en traits pleins à la position marquée par les pointillés, on présente à des bébés de 4 mois les séquences de situations suivantes :

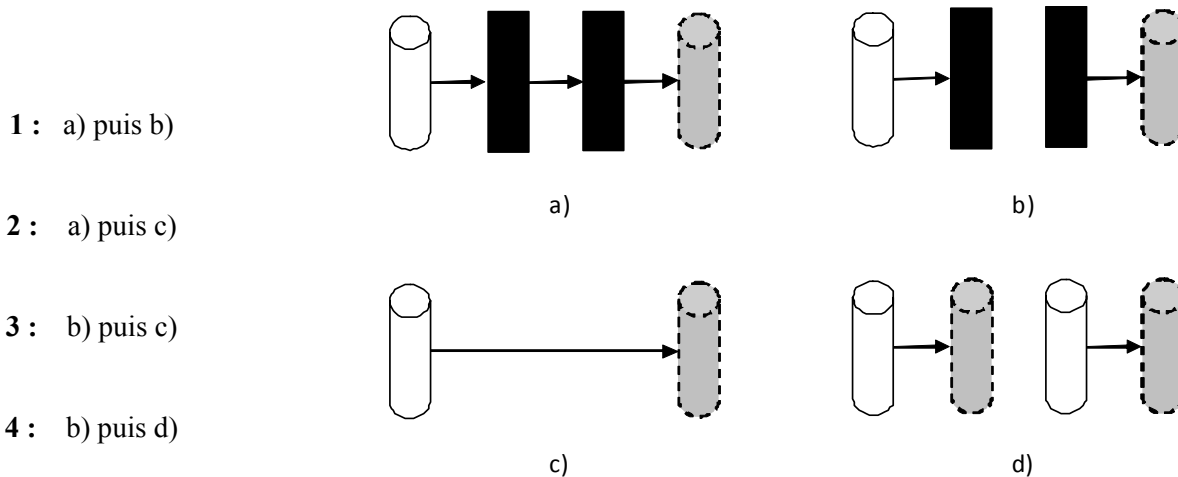


Figure 2

Par la mesure de l'attention accordée par les bébés à ces événements successifs, on détermine ceux qui les étonnent et ceux qui les ennuient. Les résultats sont étonnamment cohérents : les bébés sont globalement intéressés par la seconde situation, mais seulement dans les séquences 2 et 3. Elisabeth Spelke prouve ainsi l'existence d'un principe cognitif quasi-inné : la continuité spatio-temporelle.

A l'aide d'expériences similaires, plusieurs recherches ont montré l'existence d'autres principes chez des enfants du même âge, tels que celui de numérosité. C'est ainsi qu'en 1992, selon un protocole semblable dont les situations à comparer sont représentées sur la figure 3, Karen Wynn [13] a montré que des bébés de 4-5 mois étaient capables de calculer le résultat d'opérations arithmétiques simples (addition et soustraction).

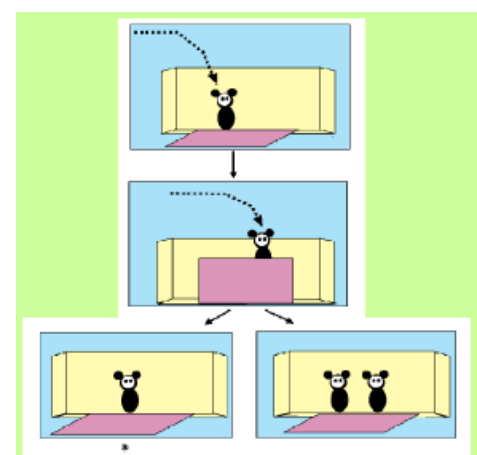


Figure 3

Mais ces résultats ne se limitent pas aux nourrissons. Ainsi une recherche d'anthropologie cognitive publiée en 2006 par P. Pica [14] a été menée sur les *Mundurucus*, peuple d'Amazonie brésilienne ne possédant ni objets ni concepts leur permettant de caractériser les formes géométriques les plus simples, ni termes permettant de nommer les chiffres au-delà de cinq. Prouvant tout de même leur aptitude à discriminer visuellement des figures aux géométries particulières, P. Pica et ses collaborateurs ont ainsi alimenté l'hypothèse selon laquelle la variation culturelle des performances mathématiques et géométriques n'empêche pas l'existence d'un « noyau de compétences communes » [15].

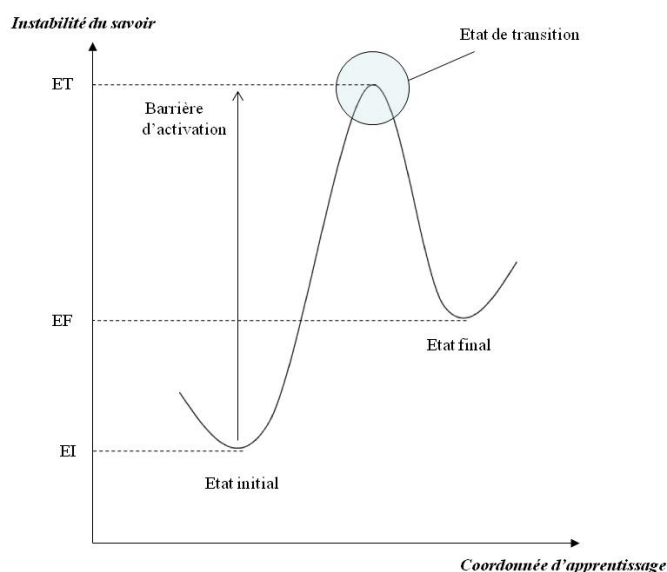
De même en linguistique, la variété des langues se ramène, selon l'école chomskienne [16, 17], à un petit nombre de règles et de propriétés syntaxiques universelles liées à une compétence commune. Au-delà de la diversité des langues, il existerait donc une grammaire universelle, laquelle renverrait à une compétence langagière préexistant à l'apprentissage.

Ces connaissances « naïves » sont parmi les plus robustes de toutes celles dont un individu peut disposer, car elles lui sont dès sa naissance imposées par son environnement le plus proche. Si ce dernier a été suffisamment riche et conforme aux comportements habituels du monde (ce qui exclut par exemple les naissances à venir sur la station spatiale internationale pour ce qui est de la gravitation), ce sont en outre des connaissances qu'un médiateur pourrait en général qualifier de « justes ». Celui qui en dispose n'aura donc que rarement, ou dans des cas très particuliers seulement<sup>26</sup>, à les remettre en question.

### *Quelques idées complémentaires relatives à « l'apprendre »*

Les recherches sur l'apprendre [19, 20] nous révèlent de leur côté l'insigne importance, pour un sujet apprenant (et son éventuel interlocuteur expert, enseignant ou vulgarisateur), de prendre appui sur ses *pré-conceptions* pour faire évoluer son savoir. En premier lieu et bien évidemment, pour lui offrir des informations qu'il soit susceptible de comprendre<sup>27</sup> et pour éviter de répondre à des questions qu'il ne se pose pas. Dans le meilleur des cas ensuite, pour compléter graduellement ces pré-conceptions<sup>28</sup>, mais le plus souvent pour les transformer (parfois radicalement) par un processus de déconstruction-reconstruction, une expérience ou une information nouvelle étant venues les contredire.

D'un point de vue psychologique, pour l'élève qui doit accepter d'abandonner une partie de ce en quoi il croyait jusque-là, ce processus de transformation des conceptions est des plus coûteux (figure 4). Et il le sera d'autant plus qu'il lui faudra davantage remettre en question les connaissances en lesquelles il avait initialement confiance.



**Figure 4 :** Diagramme représentatif de l'acte d'apprendre.

La *stabilité du savoir* peut être considérée comme le degré de confiance que l'apprenant accorde à son savoir<sup>29</sup>.

De ces considérations découle très naturellement l'idée d'utiliser les connaissances « naïves » des élèves et, plus généralement, de tout participant à une activité de médiation scientifique. C'est justement ce que propose l'approche phénoménologique des sciences.

<sup>26</sup> Cas particuliers qui permettent en l'occurrence de faire émerger la notion de *contre-intuitivité*, d'un fait ou d'une expérience, que nous avons étudiée par ailleurs [18].

<sup>27</sup> Autant du point de vue du respect de son « cadre de référence » (vocabulaire, préoccupations, valeurs...) que de ses capacités cognitives, pour lesquelles la notion de « zone proximale de développement », introduite par Vygotsky, est particulièrement pertinente et évocatrice.

<sup>28</sup> Ce à quoi se sont attachés les constructivistes (et socio-) depuis Piaget.

<sup>29</sup> Notons que cette notion de stabilité doit être distinguée de celle de justesse. Une conception fautive peut tout à fait être plus stable qu'une conception juste chez un individu donné, et c'est la raison pour laquelle il n'en changera pas ou y reviendra tôt ou tard. Nous avons décrit ailleurs les paramètres qui régissent cette stabilité [21].

## L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE

### *Pourquoi « phénoménologique » ?*

La double origine de l'idée de *phénoménologie*, philosophique et scientifique<sup>30</sup>, est la promesse d'une richesse insoupçonnée de son exploitation pédagogique. Son premier usage s'inspire de la méthode de Husserl et attribue ce qualificatif à toute philosophie qui se propose, par la description des choses elles-mêmes, de « découvrir les structures transcendantes de la conscience et des essences ».

En sciences, le terme est plus souvent employé pour désigner une approche qualitative, largement fondée sur l'observation approfondie du phénomène étudié. Elle est souvent davantage inspirée par le « sens physique » du chercheur que par les constructions formelles qui préexistent sur le sujet, même si un « paramètre phénoménologique » peut de temps à autres être introduit dans une théorie qui ne disposerait pas de la grandeur physique adéquate.

La mécanique des fluides se risque par exemple à l'utilisation de l'*hydrophobicité*, pour éviter le recours à un traitement de thermodynamique statistique des interactions des fluides avec les parois solides. Or ce paramètre n'a pas de signification réelle, la notion de « caractère hydrophobe » ne désignant qu'une absence d'hydrophilie. De même que « l'interaction hydrophobe » n'existe pas, une substance hydrophobe ne « repousse » pas les molécules d'eau ; ses constituants moléculaires attirent simplement moins ces molécules qu'elles ne s'attirent mutuellement.

Ce dernier exemple permet d'insister sur le fait que, bien que pas toujours exprimée par le chercheur, la « pensée phénoménologique » peut faire partie intégrante du processus de théorisation. Il ne s'agit donc pas d'une approche parallèle. En revanche, notre dessein est ici de montrer son intérêt et les avantages pédagogiques qui résident dans son amplification, du moins en termes de compréhension des phénomènes mis en jeu.

### *Une approche essentiellement empruntée aux disciplines émergentes*

D'un point de vue épistémologique également, cette approche constitue presque un passage obligé dans l'élaboration historique d'une discipline scientifique. C'est la raison pour laquelle, on la trouve dans les sciences très récentes, tout simplement parce que les concepts et modèles qui peuvent l'appuyer n'ont pas encore été imaginés.

C'est le cas de la physique des milieux granulaires, déjà évoqués pour d'autres raisons dans l'introduction de cet article, où des phénomènes aussi spectaculaires et contre-intuitifs que le « chant des dunes », la « dilatance de Reynolds »<sup>31</sup> ou la « ségrégation » des assemblées de grains sont encore expliqués « avec les mains », faute d'approches thermodynamiques, mécaniques ou numériques élaborées.

Le phénomène de *ségrégation*, par exemple, échappe encore à toute description thermodynamique statistique. Pour expliquer cet effet selon lequel, lorsque l'on secoue un mélange de gros et de petits grains, non seulement ils se séparent mais les gros se retrouvent rapidement au dessus des petits, les physiciens recourent simplement à l'argument de bon sens consistant à dire que « les petits grains se glissent entre les gros et occupent les espaces laissés libres par ces derniers ».

### *L'apport pédagogique de l'approche phénoménologique*

Une approche pédagogique fondée d'une part sur les pré-conceptions les plus robustes et les plus communes des individus, et d'autre part inspirée de cette démarche de recherche ne nécessitant ni prérequis, ni formalismes mathématiques, mais seulement de bonnes compétences d'observation et un minimum de bon sens est, à n'en pas douter, susceptible de permettre une médiation scientifique performante sur le plan explicatif. Un exemple très simple<sup>32</sup>, relatant une expérience réalisée dans une classe primaire lors de l'intervention de l'association *les Atomes Crochus*<sup>33</sup>, est décrit dans l'encadré ci-dessous.

<sup>30</sup> Notons qu'aucun rapport n'existe entre ce concept et les « phénoménologues » de la physique des particules [22].

<sup>31</sup> La « dilatance » est la propriété du sable mouillé de s'assécher autour des zones qui subissent des pressions, comme par exemple autour des pieds lorsque l'on marche sur une plage léchée par les vagues.

<sup>32</sup> Nous devons cette approche à notre ami Hervé This, chercheur à l'INRA.

<sup>33</sup> La plupart des activités de vulgarisation scientifique de cette association s'appuient largement sur cette approche.

### *Approche phénoménologique appliquée*

Si monter des œufs en neige requiert une certaine dextérité, un peu d'habitude et la connaissance des ingrédients idéaux et des conditions optimales de température pour les réussir, il est probablement plus facile de surmonter ces difficultés que de répondre à la question suivante :

*Pourquoi les œufs battus en neige sont-ils blancs ?*

Telle est la question qui nous fut posée un jour, lors d'une intervention des *Atomes Crochus* dans une classe primaire (Classe de CE2, Ecole de l'Arbalète, Paris 5<sup>e</sup>). L'intervention consistait alors à exposer les propriétés physico-chimiques de l'œuf, illustrées notamment par l'expérience de « décuison » du blanc d'œuf cuit et par celle de la cuisson du blanc d'œuf cru « sans source de chaleur ».

Posée à des collègues physiciens ou chimistes, la question suscite invariablement l'appel à des concepts complexes tels que la « diffusion » de la lumière sur les bulles d'air ou sa « réfraction » aux « interfaces » air-œuf. Des concepts qu'il ne serait évidemment pas raisonnable d'évoquer dans une classe primaire. Fallait-il pour autant faire à ces enfants cette réponse désespérante : « *Vous verrez ça quand vous serez plus grands* » ?

Non, car l'approche phénoménologique de la formation de la mousse de blanc d'œuf offre une manière d'y répondre. La discussion entre *Les Atomes Crochus* et Martin, appelé à réaliser l'expérience devant ses camarades, est retranscrite ci-dessous.

*Les Atomes Crochus* : Je dépose un blanc d'œuf cru et entier dans ce bol. Tu vas prendre cette fourchette et y donner deux ou trois coups de fouet.

Martin réalise l'opération avec anxiété et maladresse.

*Les A. C.* : Qu'observes-tu ?

*Martin* : Euh... Il y a des bulles ?

*Les A. C.* : Oui. Et que vois-tu encore ? Sur les bulles par exemple ?

*Martin* : Des reflets ? ... Je vois les fenêtres ... pis les lampes ...

*Les A. C.* : Très bien ! En fait, tu vois les reflets de toutes les sources de lumière de la salle : vitres, lampes, etc.

A présent, redonne encore quelques coups de fouet dans le blanc d'œuf avec ta fourchette. Que constates-tu ?

*Martin* : Il y a plus de bulles.

*Les A. C.* : Oui mais encore ? Comment sont-elles ?

*Martin* : Elles sont plus petites.

*Les A. C.* : Et les reflets, comment sont-ils ?

*Martin* : Plus gros...

*Les A. C.* : Pas vraiment, regarde bien. Ils sont plus petits parce que les bulles sont plus petites, mais comparativement à la taille de la bulle, en effet, ils prennent plus de place. Martin, peux-tu battre à présent le blanc d'œuf vigoureusement, sans t'arrêter, pour faire les bulles les plus petites et les plus nombreuses possibles ?

Martin, rassuré, s'exécute avec enthousiasme.

*Les A. C.* : Alors les enfants : que va-t-il se passer ?

*Un enfant* : Ca va faire monter le blanc en neige !

*Un enfant* : Ca va devenir blanc !

*Les A. C.* : Et pourquoi va-t-il devenir blanc ?

*Martin* : Parce qu'il ne va plus y avoir que des bulles, et toutes les bulles vont avoir un reflet blanc, alors tout sera blanc.

C'est ainsi que les enfants ont compris sans effort et sans concepts théoriques pourquoi les blancs battus sont qualifiés de blancs « en neige ». Quant à savoir s'ils auront été capables ensuite de mobiliser leur nouvelle connaissance, le lecteur pourra en juger par cette question qui a alors fusé d'un enfant jusque là silencieux :

« *Mais alors, si on éclaire l'œuf avec de la lumière rouge, le blanc en neige, il va être rouge !* »

Pourquoi alors, dans une perspective de rationalisation et de généralisation à l'ensemble des activités de médiation scientifique, ne pas justement tenter d'emprunter aux meilleurs vulgarisateurs et aux sciences expérimentales en cours de construction, cette approche largement qualitative fondée sur l'analyse expérimentale et la mise en relation des phénomènes, dont des indices de pertinence semblent en outre être fournis par les sciences cognitives ? Exemptes de concepts, de lois, de formules, de théories, d'équations ou autres formalismes scientifiques, elle mène en effet à une compréhension qualitative et ressentie, souvent largement suffisante pour appréhender les comportements et propriétés de l'univers.

Notons tout de même que la *métaphore* ne sera pas considérée comme relevant de cette approche car elle n'est qu'évocatrice ou source de moyens mnémotechniques, ce qui l'empêche d'être opératoire lorsque l'on sort du cas particulier pour lequel elle est employée. En revanche, comme l'indiquent les fondateurs de la théorie du changement conceptuel [23], elle est utile pour permettre à l'apprenant d'entrevoir la conception nouvelle vers laquelle son apprentissage doit le faire tendre.

Même si elle n'a pas été caractérisée de cette manière, cette pratique de la médiation de la physique n'est pas nouvelle : les recherches bibliographiques dans ce domaine conduisent en effet à découvrir que d'autres y ont déjà songé, sous des formes un peu différentes dénommées *Conceptual Physics* outre Atlantique [24] ou *Fisica Ingenua* en Italie [25], l'association française *1,2,3 Sciences* ayant par ailleurs proposé l'idée du « gros mot scientifique » [26]. Toutefois, faute d'un cadre théorique construit et diffusé, elle reste confinée à de petits îlots de praticiens inspirés.

### ***Les caractéristiques de l'approche phénoménologique***

Pour compenser le manque d'outils théoriques, une telle approche devra se fonder en très grande partie sur l'observation du monde réel et faire souvent référence aux phénomènes les plus courants et les plus intuitifs qui s'y déroulent. Ainsi, pour pallier l'impossibilité d'évoquer la notion « d'induction électromagnétique » ou de « courants de Foucault » dans l'interprétation du fonctionnement du ralentisseur électromagnétique des camions, on fera au préalable référence à un objet courant, la dynamo de vélo ou l'alternateur de voiture. En démontant la dynamo, on constatera qu'un courant électrique est créé par la rotation d'un aimant devant une bobine de fil, ce qui suffira (toujours dans le cadre de cette approche) pour admettre plus généralement qu'un objet conducteur du courant électrique en mouvement relatif par rapport à un aimant, est parcouru par un courant électrique.

Bien entendu, elle pourra s'appliquer aux sciences anciennes autant que récentes. Elle s'appuiera alors sur des connaissances théoriques déjà bien maîtrisées et à ce titre, étayées par des modèles scientifiques ; pour le médiateur habitué à l'approche formelle, elle nécessitera donc une « dé-formalisation » des théories en vigueur.

*A partir de l'observation et de la description des phénomènes réels, élaborer « avec les mains » des interprétations exemptes de concepts élaborés qui mènent à une compréhension qualitative mais ressentie des comportements et propriétés de l'univers...*

Telle pourrait être la définition de l'approche phénoménologique de l'enseignement des sciences. L'encart suivant reprend l'exemple de l'expérience de Galilée, plus complexe que celui de la couleur de l'œuf battu en neige, mais cette fois au travers d'un traitement conforme à cette définition.

#### **Approche phénoménologique de l'expérience de Galilée**

Nous reprenons ici l'étude de cette expérience avant l'introduction du modèle de la chute des corps élaboré plus haut, dans la première étape de l'approche théorique. En effet l'approche phénoménologique, en se dispensant de l'étape de définition des outils théoriques, permet de traiter le phénomène en une seule fois.

##### *Première phase : observation*

L'expérience consiste à lâcher deux balles (une balle de tennis et une boule de pétanque par exemple) d'une hauteur de 2 m environ et à observer leur comportement. Elle permet de réaliser que :

- \* les balles tombent ;
- \* elles adoptent le même mouvement vertical ;
- \* elles arrivent au sol au même moment.

##### *Deuxième phase : identification des propriétés et paramètres susceptibles d'intervenir dans le mouvement*

Il convient à présent d'identifier les paramètres importants. Là encore, de nombreuses propriétés de l'objet d'étude sont susceptibles d'intervenir. Heureusement, comme cela a été évoqué plus haut, l'approche est facilitée pour le médiateur par la connaissance des paramètres réellement déterminants. Et en effet, il pourra d'emblée éliminer la température ou la présence ou non d'air à l'intérieur de la balle par exemple, non sans avoir pris le soin de réfléchir à la façon de monter qu'ils ne sont en effet pas significatifs, au cas où on lui poserait la question.



Par suite, nous pouvons retenir là encore :

- \* la propriété de ces objets à être attirés par la Terre ;
- \* la difficulté qu'il y a à mettre ces objets en mouvement ;
- \* la taille des balles ;
- \* la capacité de l'air à en freiner le mouvement.

De même la vitesse et son augmentation constituent des paramètres à prendre en compte (on considère ici que les notions de vitesse et d'accélération sont des concepts connus, au sens de leur signification courante).

#### *Troisième phase : étude phénoménologique de l'importance de la « résistance de l'air »*

Il est possible que, avec des enfants par exemple, cet effet ne soit pas évoqué. Cependant s'il l'est, il est important de pouvoir y répondre avec rigueur, sans toutefois entrer dans des explications trop abstraites.

Pour cela, il suffit de poser les deux balles sur un support horizontal lisse et de souffler modérément dessus à une distance d'une vingtaine de centimètres. La boule de pétanque ne bougera pas et la balle de tennis, si elle bouge, ne le fera que très peu. Ainsi on montre que dans les conditions de la chute où le courant d'air subit par les balles est de force comparable, la « résistance de l'air » est probablement un paramètre négligeable.

L'étape d'abstraction, qui consiste à passer de l'idée de la « résistance de l'air » s'exerçant sur un objet en mouvement vertical à celle de l'effet du souffle sur la rupture de leur immobilité, n'est pas très difficile et s'avère très formatrice.

En outre, l'expérience permet de mettre en évidence qualitativement l'importance du rapport surface/poids de l'objet dans sa sensibilité à l'effet de l'air : la même expérience réalisée sur une boule ou une feuille de papier montre que l'air a bien un effet sensible sur certains objets légers ou de grande surface.

#### *Quatrième phase : étude phénoménologique de la chute*

L'approche est simple : elle consiste à montrer « avec les mains » comment « l'inertie » de la boule de pétanque compense la plus forte « attraction gravitationnelle » qu'elle subit (sans bien sûr prononcer ces mots).

Saisissons une balle dans chaque main. La boule de pétanque apparaît plus « lourde », elle est donc plus attirée par la Terre que la balle de tennis. C'est ce qui explique que nombreux sont ceux qui pensent qu'elle touchera le sol en premier.

Secouons à présent les deux balles ; on constate que la boule de pétanque est beaucoup plus difficile à agiter. Il ne s'agit plus de l'effet de son poids puisque secouée dans un plan horizontal, la constatation est la même. Une analogie peut conforter cette idée : s'il est possible de déplacer un petit yacht amarré en tirant sur son amarre, il est beaucoup difficile (mais pas impossible néanmoins, à condition d'exercer la même force beaucoup plus longtemps [27]) de le faire avec un paquebot<sup>34</sup>. Par suite, un objet massif est plus difficile à mettre en mouvement qu'un objet qui l'est moins.

Appliquons à présent ces deux constatations à la chute des balles : la boule de pétanque, bien que plus attirée par la Terre, est plus difficile à mettre en mouvement par cette même action de la Terre. Les deux effets se compensent donc, à chacun des moments de la chute ; les deux balles touchent le sol au même moment.

#### *Cinquième phase : limites de l'approche*

Evidemment, il est impossible de montrer de cette façon que les deux effets se compensent exactement. C'est pour cette raison que l'approche ne peut être que qualitative. Toutefois, comme nous l'avons évoqué dans l'encadré correspondant, ce problème constituait également une limite de l'approche formelle, même s'il y apparaissait beaucoup moins clairement. En effet, il est hautement non trivial de montrer que masse gravitationnelle et masse d'inertie sont égales<sup>35</sup>. Or c'est cette égalité qui permettait de simplifier l'équation  $m \cdot g = m \cdot a$  dans l'approche formelle et de montrer par suite que... l'inertie et l'attraction gravitationnelle se compensent !

#### *Sixième phase : dépassement de ces limites*

Si le raisonnement ci-dessus ne permet pas de montrer que les deux effets se compensent exactement, Galilée lui-même apporta la démonstration qu'en aucun cas un objet massif ne pouvait tomber plus vite qu'un objet léger. Et cette démonstration très élégante<sup>36</sup>, fondée sur un raisonnement simple « par l'absurde », a toute sa place dans notre approche car elle entre elle aussi dans le cadre de l'approche phénoménologique :

« Supposons qu'un corps plus massif tombe plus vite qu'un corps léger, alors, si on attache à l'aide d'une ficelle une grosse pierre et une petite et qu'on les lâche, la grosse pierre devrait être ralentie dans son mouvement de chute par la petite qui a priori tombe moins vite<sup>37</sup>. Donc le couple petite pierre + grosse pierre tombe moins vite que la grosse pierre toute seule, pourtant moins lourde. Cette conclusion est en contradiction avec l'hypothèse de départ qui s'en trouve donc infirmée. »

<sup>34</sup> On évitera, dans le cadre de cette analogie, d'évoquer les effets de frottements de l'eau qui sont encore une fois secondaires.

<sup>35</sup> Cette démonstration a été réalisée par Einstein en 1915 dans le cadre de la théorie de la relativité générale.

<sup>36</sup> Voir à ce sujet le site web de S. Charnoz (Equipe Universitaire Gamma-G, Paris VII CEA / Sap), indiqué dans la référence [28].

<sup>37</sup> On retrouve ici la notion « d'inertie » de la petite pierre, qui de par sa masse, offre une « résistance » à sa mise en mouvement par la grosse pierre.

### *Septième phase : retour sur l'effet de la « résistance de l'air »*

On a montré plus haut que la balle de tennis était plus sensible au souffle que la boule de pétanque lorsqu'on les avait posées sur une surface lisse. Par suite, l'effet de « résistance de l'air », même s'il est négligeable, est plus important sur cette balle. Cela signifie que sur une distance plus grande, la balle de tennis sera probablement retardée par rapport à la boule de pétanque... et c'est ce qui est en effet observé.

En revanche, l'étude du même effet dans l'approche formelle est beaucoup plus délicate car elle nécessite la modélisation du frottement ( $f = -\lambda \cdot v$  par exemple,  $\lambda$  étant approximativement le même pour les deux balles), son introduction dans le principe fondamental de la dynamique et la constatation que, lorsque l'ensemble de l'équation est divisée par la masse de l'objet, il apparaît un terme en  $\lambda/m$  d'autant plus petit que  $m$  est plus grande. Autant d'étapes difficiles à appréhender pour l'élève ou le spectateur de science, alors que souffler sur une balle et observer le résultat ne lui demande que peu de mobilisation.

Cet exemple montre que l'approche phénoménologique peut même dans certains cas présenter un avantage théorique net sur l'approche formelle.

### ***Des désirs de généralisation***

Au-delà de la vulgarisation scientifique dont elle est partiellement issue, pourquoi alors ne pas étendre cette approche à l'enseignement des sciences, pour enrichir l'approche théorique habituelle ? Elle est en effet possible pour toutes les sciences, à condition de faire l'effort de revenir à l'essence des choses. Bien souvent pour l'enseignant de sciences, cette approche est facilitée par le fait qu'il dispose déjà des connaissances scientifiques nécessaires à la compréhension du phénomène étudié et qu'il n'a qu'à les « dé-formaliser ».

Avec toutefois la restriction liée au fait que cette opération nécessite un prérequis indispensable : celui d'avoir parfaitement « compris » les raisons profondes du comportement observé et non pas d'avoir simplement retenu les lois et les modèles qui en rendent compte. Pour prendre conscience de cette difficulté, il suffit de demander à des enseignants de physique, quel qu'en soit le niveau, de justifier la présence de la puissance double dans l'expression de l'énergie cinétique étudiée plus haut. La dernière partie de ce texte propose quelques thèmes particulièrement adaptés à cette approche.

Mais si cette compréhension théorique formelle préalable peut faciliter une approche phénoménologique, avoir compris et retenu les lois et modèles d'une science particulière n'est toutefois pas indispensable pour en avoir un entendement clair ; en effet, l'approche phénoménologique permet une compréhension d'autant plus fine des phénomènes qu'elle s'appuie sur l'expérience directe des choses. Par suite, cela permet à un enseignant néophyte dans une discipline mais initié par cette approche, d'en présenter les bases à ses élèves. C'est également sur ce principe que des « médiateurs scientifiques » dans les musées scientifiques et autres associations telles que les *Petits Débrouillards* œuvrent parfois avec brio auprès du public, sans avoir jamais reçu de formation scientifique.

Ainsi, cette manière de donner du sens au monde sans s'encombrer d'un vocabulaire scientifique souvent mal compris présente-t-il un intérêt manifeste dans l'enseignement des sciences, et dans sa médiation en général. Quels que soient nos interlocuteurs, en formation ou non, qu'ils se destinent non à une carrière scientifique, il nous paraît important que tous gardent des sciences une connaissance ressentie et opératoire des phénomènes, plutôt que des concepts désincarnés, des termes abscons déformés et des bouts de théorèmes inopérants.

A ce titre, gageons que l'élaboration de « modèles pédagogiques » [8], faux du point de vue académique mais aptes à transmettre aux élèves une vision cohérente et opératoire du monde, saurait également faire avancer la pratique de l'enseignement des sciences... Et dans le chapitre du *Savoir en construction* [29] intitulé : *Exprimer le savoir dans une forme concrète*, Britt-Mari Barth ne préconise pas autre chose lorsqu'elle écrit :

*« Les définitions pour comprendre seront peut-être, dans un premier temps, exprimées dans un langage que beaucoup d'enseignants considèrent comme non scientifique et inacceptable Mais il faut les voir comme des outils en cours de fabrication: elles peuvent ensuite évoluer vers une plus grande abstraction pour se retrouver au niveau d'un consensus mathématique hautement abstrait - compris cette fois et non pas simplement reproduit. Or, si on n'a pas donné la possibilité aux apprenants de passer par ces étapes progressives de construction de l'abstraction, ils risquent de ne jamais le faire ».*

D'autant plus que cette manière d'approcher les phénomènes scientifiques ne dénigre en rien l'approche formelle. Au contraire, elle lui prépare le terrain de manière optimale, montrant aux apprenants qui s'y intéressent les limites d'une telle démarche et, à partir d'un certain niveau de complexité, la nécessité d'un vocabulaire et de théories adaptés. Le formalisme arrive alors à point nommé pour compléter les lacunes et permettre « d'aller plus loin ». Les formules, lois et autres concepts prennent alors un véritable sens pour l'apprenant.

#### **Pour résumer...**

L'approche phénoménologique ne fait pas intervenir de concepts scientifiques formalisés et tente simplement de décrire et d'interpréter les phénomènes avec des mots et des concepts de tous les jours. Elle n'est ni quantitative, ni prédictive mais offre une vision incarnée et ressentie des comportements de la nature.

Elle ne nécessite que très peu de connaissances préalables et permet d'introduire quelques concepts scientifiques de base. Se conjuguant parfaitement avec l'approche théorique formalisée classique et diversifiant les points d'entrée vers les conceptions des élèves et des publics, elle leur permet une assimilation des concepts et des lois plus aisée et plus opératoire.

### **L'ARTICULATION DES APPROCHES THEORIQUES DESCRIPTIVE, FORMELLE ET PHENOMENOLOGIQUE**

Dans les parties précédentes, conscients du fait qu'une approche déconnectée des acquis de la science moderne serait très insuffisante pour atteindre les objectifs de n'importe quelle forme de médiation scientifique, nous n'avons jamais préconisé le rejet de l'approche formelle au profit d'une approche phénoménologique pure. Nous avons même, et au contraire, introduit l'idée d'une « dé-formalisation » des théories, cette nuance permettant d'introduire une forme de médiation opératoire de la science moderne qui consiste à reprendre les résultats et les modes de raisonnement (c'est-à-dire la « manière de voir »)<sup>38</sup> de la science académique, mais sans en réutiliser les concepts et les formalismes.

En effet, toute activité de médiation scientifique s'inspire toujours peu ou prou, ne serait-ce que momentanément, de l'une des trois approches fondamentales que nous avons nommées formelle, phénoménologique et descriptive. Pour représenter et rationaliser cette idée, il est donc utile d'introduire un modèle de la médiation des connaissances scientifiques qui permette de visualiser à la fois les différentes approches fondamentales, idéalisées par l'exacerbation de leurs caractéristiques, et la manière dont elles s'articulent et interfèrent. Ce modèle permet alors de faire émerger, de distinguer et de caractériser différentes formes de la médiation réelle.

C'est ce que propose l'encadré suivant.

#### **Les trois approches fondamentales de la médiation scientifique**

Revenons un instant sur l'importance du terme « dé-formalisation ». Car en effet, une approche phénoménologique n'aurait *a priori* pas besoin de se priver de l'emploi d'outils formels. La reformulation et la simplification des modèles et théories scientifiques, telles que la pratiquent la plupart des vulgarisateurs, peuvent tout à fait présenter les caractéristiques d'une approche phénoménologique si elles font appel à l'analogie, à la métaphore, aux comparaisons et si elles s'efforcent de tisser des liens aussi nombreux que possible entre les notions abordées et la réalité.

Elles constituent ainsi une forme phénoménologique réelle de médiation scientifique, bien que partiellement conceptualisée. Une telle approche, que nous qualifierons de « reformulation » des modèles scientifiques, est certes plus facile à adopter que l'approche phénoménologique « dé-formalisée » car le médiateur y conserve un contact avec « son » monde, le monde de l'abstraction, dans lequel il peut se réfugier au moindre doute. Mais pour le spectateur de science ou l'élève en difficulté, elle est souvent encore trop formelle. C'était notamment le cas de toutes les approches qualitatives dérivées de l'approche formelle et décrites plus haut, qui pourraient entrer dans cette catégorie née de l'interaction entre approches formelle et phénoménologique pures.

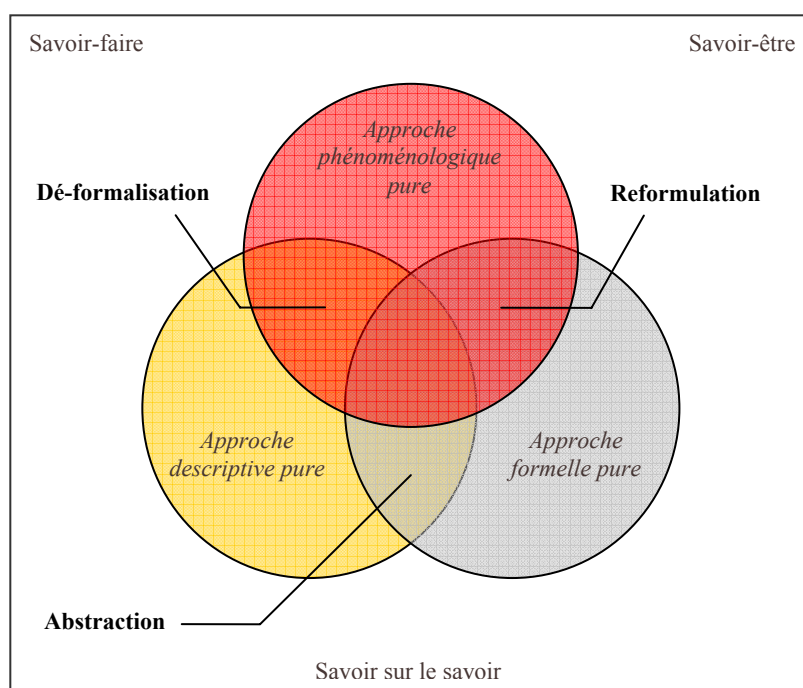
Pour préciser ces nuances, le diagramme présenté dans la figure 1 montre à la fois la différence et la complémentarité des deux approches phénoménologiques descriptive (« dé-formalisation ») et formelle (reformulation). Les connaissances scientifiques (savoirs-connaissances) y sont présentées dans un cadre qui réunit les trois autres types de savoirs (savoirs-être (attitudes), savoirs-faire (démarches) et savoir sur le savoir (méta-savoir)).

<sup>38</sup> En des termes épistémologiques, on dira que cette approche s'inscrit dans les paradigmes de la science moderne.

Leur médiation peut se décrire comme la déclinaison et la composition de trois approches idéalisées représentées par trois disques qui se superposent :

- L'approche « descriptive » pure rappelle la « leçon de chose » du début du 20<sup>ème</sup> siècle ; aucun concept scientifique abstrait n'y a sa place. Elle se fonde sur quelques règles simples qui associent les divers paramètres que l'on a jugé bon de dégager et de nommer.
- L'approche « formelle » pure est totalement abstraite ; elle ne fait appel ni à l'observation ni à l'interprétation ressentie des phénomènes ; elle se fonde uniquement sur des constructions mathématiques (modèles, lois, principes, théorèmes...).
- L'approche « phénoménologique » pure, enfin, ne décrit ni ne conceptualise ; elle fournit simplement une interprétation qualitative, intuitive et ressentie des phénomènes.

Ces approches idéalisées n'ont bien sûr aucun sens si on ne les considère pas en interaction les unes avec les autres. En revanche, l'interpénétration des trois disques auxquels elles correspondent fournit diverses approches réelles possibles pour la médiation scientifique (figure 5).



**Figure 5 :** Les trois approches fondamentales de la médiation scientifique se combinent pour donner naissance aux trois formes réelles : abstraction, reformulation et dé-formalisation.

### Les trois approches réelles de la médiation scientifique

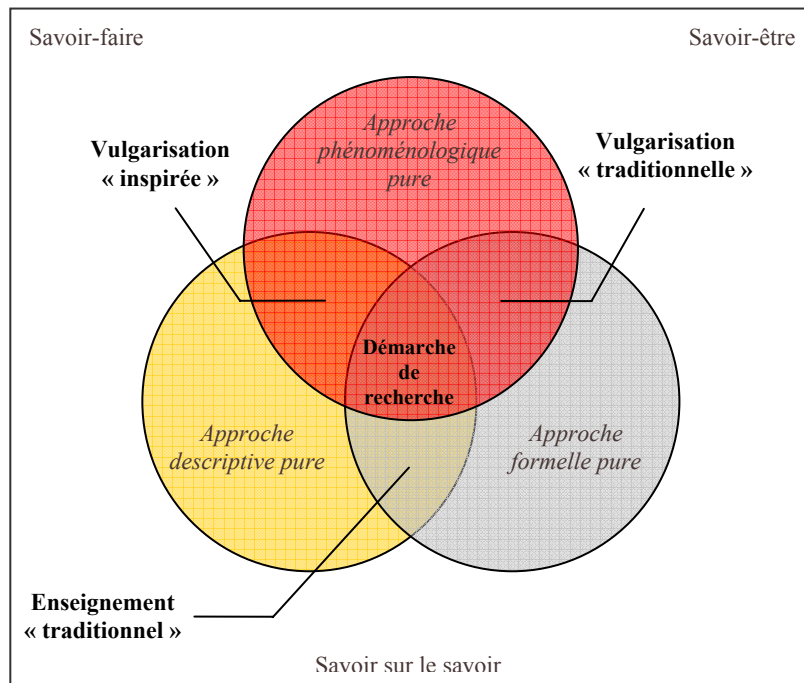
C'est à présent à travers cette grille d'analyse que nous pouvons caractériser chaque forme de médiation scientifique.

- L'approche phénoménologique « dé-formalisée » (ou « dé-formalisation ») : elle a été définie dans les parties précédentes et donne lieu à une forme de vulgarisation que nous nommerons « inspirée », faisant par-là doublement référence aux faits qu'elle est 1/ inspirée par la théorie formelle et 2/ pratiquée par quelques vulgarisateurs « inspirés » seulement.
- L'approche phénoménologique théorique (ou reformulation) : largement employée par la plupart des vulgarisateurs, elle peut inclure les discours qualitatifs dérivés de l'approche formelle. Elle donne lieu à une vulgarisation que l'on peut par suite qualifier de « traditionnelle ».
- L'approche descriptive formelle : elle correspond à l'activité de la recherche théorique. Elle inspire malheureusement une vision idéalisée de l'enseignement scientifique, souvent appliquée à partir de l'école secondaire.

Comme le précise la figure 6, la vulgarisation scientifique, l'enseignement des sciences et l'activité de recherche, tels qu'ils se pratiquent en général, ont des territoires de prédilection relativement bien délimités, liés à leurs objectifs et conditions de réalisation :

- La vulgarisation est généralement pointilliste en termes de connaissances abordées ; elle s'adresse à des publics non captifs et hétérogènes, ce qui oblige à ne se fonder que sur peu de prérequis. Elle se doit d'être phénoménologique, mais sans perdre de vue l'aspect théorique des choses pour rester connectée à la science réelle.

- Un enseignement s'adresse à un public captif et homogène ; il s'inscrit dans une progression qui nécessite une assimilation permanente de nouvelles règles et définitions. Il se doit donc d'être un minimum théorique, mais il peut bénéficier de l'approche phénoménologique.
- L'activité de recherche, enfin, ne peut se passer d'aucune des trois approches car en complément de l'observation et de la description, c'est l'étape phénoménologique qui permet la compréhension du phénomène avant sa modélisation et sa formalisation.



**Figure 6 :** L'enseignement des sciences se doit d'être théorique mais peut bénéficier de l'approche phénoménologique ; la vulgarisation scientifique, quant à elle, ne peut s'aventurer en-dehors des « terres » phénoménologiques.

Mais rien n'empêche bien entendu un vulgarisateur de se promener entre l'approche formelle et l'approche descriptive de temps à autres, ni l'enseignant à s'essayer au jeu des approches phénoménologiques. Dans ce dernier cas et comme nous l'avons montré plus haut, on pourrait même ajouter qu'au contraire, l'élève à tout à gagner à ces possibles incursions de son enseignant dans ces formes de médiation. Car finalement, l'idéal ne serait-il pas, pour le vulgarisateur comme pour l'enseignant, de se placer dans le triangle central, celui de la recherche scientifique, là où toutes les approches se conjuguent ?

## CONCLUSION

Ainsi l'approche phénoménologique apparaît comme souvent bien mieux adaptée à l'enseignement et à la vulgarisation que l'approche formelle. Dans le cadre des actions de vulgarisation, où le médiateur n'a pas le temps d'introduire les concepts et formalismes nécessaires à la compréhension ultérieure du modèle correspondant au phénomène qu'il souhaite présenter, nul doute que cet outil puisse-être d'une formidable utilité.

Quant à l'enseignement des sciences, la combinaison des approches phénoménologique et formelle peut également permettre une très grande diversification des approches pédagogiques tout en respectant les attentes et les conceptions des élèves. Cette complémentarité peut d'ailleurs exister jusque dans l'évaluation. En effet, pour éviter que les élèves ne se « cachent » derrière des formules ou des applications de lois, pourquoi ne pas leur demander de donner une explication phénoménologique d'une situation problème, où ils pourraient utiliser le langage quotidien, plus familier, en complément à un langage plus scientifique ?

Mais comme toujours, la panacée n'existe pas et, en matière de transposition didactique de connaissances académiques complexes, il convient de rechercher l'optimum qui correspond à la fois au thème traité et à la nature de son public. Une approche n'exclut jamais l'autre, d'autant plus que le but de l'enseignement et de la médiation scientifiques ne consiste pas uniquement en la compréhension du monde.

Dans l'optique de former de futurs scientifiques, en effet, l'appréhension des cadres théoriques les plus admis est elle-aussi indispensable, tout comme l'apprentissage de la modélisation ou de la simulation, l'habileté calculatoire ou l'utilisation des instruments de mesure. Et tant que nous y sommes, rajoutons donc quelques pincées d'histoire, de sociologie et de philosophie des sciences...

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Feynman, R. (1980) *Qu'est-ce que la science ?* in *La nature de la physique*, Seuil points Sciences, Paris.
- [2] This, H. (2002) *Casseroles et éprouvettes*, Editions Pour la Science/Belin, Paris.
- [3] *Dis, Jérôme ? Les secrets de la physique expliqués par J. Bonaldi*, Paris, Albin Michel, 1991.
- [4] *Dis, Jérôme ? Les secrets de la physique expliqués par J. Bonaldi*, Canal + vidéo, 1991.
- [5] Kuhn, T. (1983) *La structure des révolutions scientifiques*, Champs, Flammarion, Paris
- [6] *Les grands scientifiques* ; J. Meadows ; Armand Colin, 1989, Paris.
- [7] *Ce chant venu des dunes* ; S. Douady ; Journal du CNRS, **153-154**, sept-oct 2002.
- [8] *La modélisation dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences* ; A. Giordan, Impact : science et société **164**, p. 337-353.
- [9] Dewey, J. (1990) *Démocratie et éducation*. Armand Colin (trad. fr. Deledalle G., réed. 1975 et 1916 pour le texte original). Cité par Kleinpeter, E. Projet de thèse.
- [10] <http://www.atomes-crochus.org> Dernière consultation : avril 2007.
- [11] *Marie Curie, Leçons de science*, éditions EDP, 2003, Paris.
- [12] Dehaene, S. Spelke, L. Pinel, P. Stanescu, R. Tsivkin, S. (1999) *Sources of mathematical thinking : behavioral and brain-imaging evidence*. Science, **284**, 970-974.
- [13] Wynn, K. (1992) *Addition and subtraction by human infants*, Nature **358**, 749 – 750.
- [14] Pica, P. Lemer, C. Izard, V. Dehaene, S. (2004) *Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group*, Science, vol. CCCVI, n°5695, 15 octobre 2004.
- [15] Journet, N. (2006) *Euclide en Amazonie*, Sciences Humaines, n° 172, juin 2006.
- [16] Chomsky, N. (2000) *The Architecture of language*, Oxford University Press.
- [17] Dehaene, S. (2003) *Les bases naturelles d'une acquisition culturelle: la lecture*, in Changeux, J.-P. *Gènes et cultures*, Odile Jacob, Paris.
- [18] Eastes, R.-E. Pellaud, F. (2004) *Un outil pour apprendre : Intérêts, limites et conditions d'utilisation de l'expérience contre-intuitive* ; Bulletin de l'Union des Physiciens spécial didactique, juil-août-sept.
- [19] Giordan, A. (1998) *Apprendre !* Belin, nouvelle édition 2002.
- [20] De Vecchi, G. Giordan, A. (2002) *L'Enseignement scientifique : Comment faire pour que « ça marche » ?* Delagrave, Paris.
- [21] Pellaud, F. Eastes, R.-E. Giordan, A. (2005) *Un Modèle pour comprendre l'apprendre : le modèle allostérique*, Gymnasium Helveticum, Janvier 2005.
- [22] Baruch, J.-O. *Neutrinos : la course des phénoménologues* ; La Recherche **345**, sept. 2001, p. 18-19.
- [23] Posner, G. Strike, K. Hewson, P. Gertzog, W. (1982) *Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change*, Science Education, 66 (2), 211-227.
- [24] Hewitt, P. (2002) *Touch this! Conceptual physics for everyone*, Addison-Wesley. Consulter également la page [www.conceptualphysics.com/books.shtml](http://www.conceptualphysics.com/books.shtml) (dernière consultation: avril 2007).
- [25] Bozzi, P. (1998) *Fisica ingenua : studi di psicologia della percezione*, Garzanti.
- [26] *L'agitateur* ; 1, 2, 3 Sciences, Antony, [www.123-sciences.asso.fr](http://www.123-sciences.asso.fr) (dernière consultation : avril 2007).
- [27] Collectif (New Scientist, 2006), *Mais qui mange les guêpes ? et 100 autres questions idiotes et passionnantes*, Collection Science Ouverte, Seuil, Paris.
- [28] *Histoire de la gravitation* (dernière consultation : avril 2007) : <http://www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/GRAVITATION/gravitation.html>
- [29] Barth, B.-M. (1993) *Le savoir en construction*, éd. Retz, Paris, p. 131.
- [30] Eastes, R.-E. Pellaud, F. (2003) *Déconceptualiser les sciences ou les vertus de l'approche phénoménologique : de la vulgarisation des concepts scientifiques à leur enseignement*, Actes des XXV<sup>èmes</sup> JIES, A. Giordan, J.-L. Martinand, D. Raichvarg.
- [31] Eastes, R.-E. Pellaud, F. (2002) *Surprendre*, Cahiers pédagogiques, n° 409, décembre 2002.
- [32] Pellaud, F. Giordan, A. (2002) *Faut-il encore enseigner les sciences ?* L'Actualité Chimique, juillet 2002.

## ANNEXE : L'APPROCHE PHENOMENOLOGIQUE EN PRATIQUE

La nouveauté introduite par cet article portant essentiellement sur la caractérisation de la notion d'approche phénoménologique « inspirée », c'est elle que nous allons à présent illustrer par quelques exemples, explicités et commentés, pour donner corps à ces constats issus de nos propres expériences de vulgarisateurs et d'enseignants de sciences.

Lors d'un atelier de trois heures auquel participaient une vingtaine d'enseignants de sciences et de didacticiens<sup>39</sup>, nous avons proposé aux participants de notre atelier un certain nombre de faits théoriques et expérimentaux, presque toujours fondés sur des expériences que nous avons apportées. Ces dernières étaient choisies parmi les expériences dites *contre-intuitives* [18, 31], dont les traitements non théoriques sont particulièrement formateurs. En effet, s'il est possible de donner une interprétation phénoménologique à un fait contre-intuitif, c'est qu'elle est suffisamment performante pour dépasser l'intuition naturelle du phénomène et atteindre le niveau explicatif de l'approche formelle usuellement invoquée.

Les propositions étaient faites aux participants sous forme de questions simples sur le modèle des animations expérimentales interactives des *Atomes Crochus* [10], affichées à l'écran et regroupées en trois catégories :

1. Des observations de la vie courante ne nécessitant pas nécessairement de traitement formel, mais dont l'interprétation n'est pas immédiatement évidente.

*Exemple : Pourquoi l'œuf battu en neige est-il blanc ?*

2. Des phénomènes naturels ou artificiels dont les interprétations des vulgarisateurs font toujours appel à des principes physiques ou des modèles formels.

*Exemple : Pourquoi les cyclones tournent-ils dans le sens horaire dans l'hémisphère sud ?*

3. Des faits théoriques formels qu'il s'agissait de démontrer sans calcul.

*Exemple : Pourquoi les lois d'attraction gravitationnelle et électrostatique varient-elles en  $1/r^2$  ?*

La première de ces catégories illustre de manière simple la notion d'approche phénoménologique inspirée et montre qu'elle est employée relativement spontanément dans certains cas. La seconde, quant à elle, est au cœur du problème posé par l'introduction de notre article : comment parler du sens de rotation des cyclones sans faire appel à la force de Coriolis et à son produit vectoriel<sup>40</sup> ? La dernière de ces catégories permet de montrer que, contre toute attente, la portée de l'approche phénoménologique peut être étendue au sein même d'un modèle mathématique, pour démontrer des résultats qui nécessitent en général des outils théoriques formels (ici, le théorème de Gauss) dont on peut alors s'affranchir.

Nous avons alors laissé les participants expérimenter de manière très libre, par petits groupes de 4 à 5 personnes, avec une consigne simple : « *Après avoir repéré le concept ou le phénomène à l'œuvre dans l'expérience, trouver une explication s'abstenant, dans la mesure du possible, de faire appel à un langage scientifique abstrait* ». Durant la deuxième partie de l'atelier, nous leur avons demandé de donner à l'ensemble du groupe les explications ainsi élaborées.

Dans cette seconde partie, aucune interprétation péremptoire n'a jamais été donnée aux participants, qu'elle soit théorique ou non. Lorsqu'ils n'avaient pas réalisé certaines des expériences, nous leur avons toujours demandé de prévoir leurs résultats avant de les mettre en œuvre, conformément aux précautions que nous ont dicté nos recherches sur les expériences contre-intuitives [18, 31].

Les séquences ont été filmées avec l'accord des participants. L'analyse que nous en faisons ci-dessous porte sur trois expériences issues des deux premières catégories proposées ci-dessus. La troisième catégorie sera ultérieurement illustrée par deux paragraphes complémentaires. Dans chaque cas, après avoir décrit l'expérience, nous proposerons l'interprétation proposée habituellement par les vulgarisateurs, qui relève de la « reformulation » telle que nous l'avons définie ci-dessus. Nous la compléterons par une interprétation possible, relevant de l'approche phénoménologique inspirée, puis nous commenterons le déroulement de la séquence correspondante durant l'atelier, ainsi que les réactions des participants.

<sup>39</sup> JIES, Chamonix, décembre 2003. Consulter les actes de ce colloque dans la référence [30].

<sup>40</sup> Rappelons que la force de Coriolis appliquée à un objet de masse  $m$  se déplaçant à la vitesse  $\mathbf{v}$  sur un référentiel tournant avec un vecteur vitesse de rotation  $\boldsymbol{\omega}$  s'écrit :  $\mathbf{f} = -2m \cdot \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}$

## **PREMIER EXEMPLE : POURQUOI LE BLANC D'ŒUF BATTU EN NEIGE EST-IL BLANC ?**

**Catégorie de l'expérience :** 1

**Matériel :** Un œuf cru, une tasse, un bol, un fouet ou une fourchette.

**Description de l'expérience :** Casser l'œuf, séparer le blanc du jaune, déposer le jaune dans la tasse et le blanc dans le saladier, battre le blanc, observer.

**Observations :** L'air est incorporé dans le blanc d'œuf sous forme de bulles d'autant plus petites et résistantes que l'on fouette davantage. Ce faisant, le liquide initialement jaune et visqueux se rigidifie et devient de plus en plus blanc.

### **Explication par « reformulation »**

En effet, la lumière est diffusée dans toutes les directions par les bulles et ce, d'autant plus qu'elles sont plus petites. Ces bulles font apparaître la masse qu'elles constituent comme étant blanche.

### **Explication par approche phénoménologique inspirée**

Donnons un seul coup de fouet ou de fourchette dans l'œuf liquide et observons les quelques bulles qui se sont formées : elles sont larges et fragiles et sur chacune d'elles, on reconnaît le reflet des sources de lumière présentes dans la pièce (fenêtres, lampes, etc.).

Donnons alors un, puis deux, puis trois, puis quatre coups de fouet supplémentaires : les bulles sont de plus en plus petites, de plus en plus solides et toutes continuent de refléter les sources de lumière de la pièce. Mais les reflets occupent de plus en plus de place sur la surface apparente des bulles au fur et à mesure que leur taille diminue et qu'elles « se compactent » les unes contre les autres.

Terminons de battre l'œuf en neige : les bulles emplissent cette fois tout le volume ; très petites, elles sont très résistantes et collées les unes contre les autres. Les parties à l'air libre se confondent avec les reflets des sources de lumière et toute la surface s'est emplie de minuscules reflets disposés les uns à côté des autres. Elle apparaît blanche. Il est en outre probable que l'intérieur du blanc d'œuf battu en neige soit sombre et que sous une lumière rouge, on parlerait de « rouges battus en neige ».

### **Analyse de l'atelier**

Dès la première explication nous pouvons constater combien il est difficile d'abandonner les termes scientifiques :

- « Il s'agit d'un réarrangement moléculaire ».

Suit une analogie avec les globules rouges. Bien que les propositions suivantes soient formulées dans un langage plus quotidien, les principes évoqués, quant à eux, restent liés à des connaissances apprises :

- « La lumière « rebondit » autrement vers mon œil à cause de la forme des bulles ».
- « Toute la lumière étant blanche, cela veut dire que toute la lumière est reflétée par les bulles ».
- « Tout ce qui est incolore devient blanc quand il mousse. »

Peu à peu, des termes tels que « diffusion de la lumière », « lumière blanche » sont évacués, car ils font appel à une connaissance apprise. Reste que l'explication purement phénoménologique est difficile à trouver. A chaque fois, il faut reposer la question : « Qu'est-ce qu'on voit ? » pour que les participants « oublient » de faire référence à ce qu'ils savent de la lumière et de sa diffusion.

Ce n'est qu'en forçant les participants à se concentrer sur une observation clairement dirigée qu'ils parviennent à observer, d'abord un arc-en-ciel, puis à dire que chaque bulle joue le rôle d'un miroir, reflétant le plafonnier, les fenêtres, la pièce...(clips 3 à 6).

Certaines réticences apparaissent, notamment liées à l'analogie que les enfants pourraient alors faire entre la neige et le blanc d'œuf battu, associant la neige à autant de petits miroirs (clip 7).



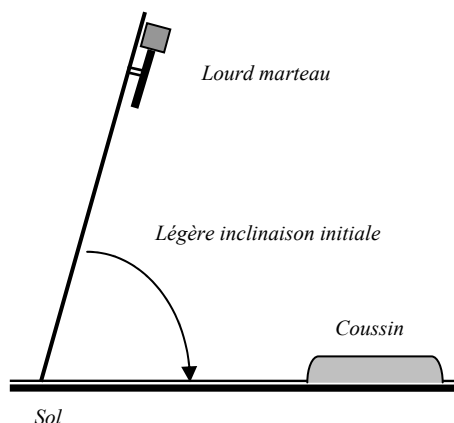
## DEUXIEME EXEMPLE : LES DEUX PLANCHES

**Catégorie de l'expérience :** 2

**Matériel :** Deux planches d'1m de long, l'une portant à son extrémité un gros marteau, un coussin.

**Description de l'expérience :** En donnant une faible inclinaison aux deux planches par rapport à la verticale, marteau en haut, les lâcher en même temps en maintenant une extrémité au sol. Observer laquelle tombe le plus vite. S'assurer que le marteau tombe sur le coussin.

La figure 7 propose une représentation schématique du dispositif. On prendra le soin de présenter l'expérience de dite « de Galilée » avec une balle de tennis et une boule de pétanque, à un moment ou un autre de la séquence.



**Figure 7 :** Schéma du dispositif ; la seconde planche sans marteau, placée à côté de la première avec la même inclinaison, n'est pas représentée par commodité.

**Observations :** La planche sans marteau tombe plus vite que l'autre. L'écart entre les deux contacts avec le sol dépend de l'inclinaison initiale.

### **Explication par « reformulation »**

Le traitement du problème nécessite de faire appel au théorème du moment cinétique mais, à cause de la répartition inégale des masses le long de la tige, son traitement est long et fastidieux. Un article sur le sujet est en cours de rédaction, en collaboration avec une équipe d'enseignants italiens.

### **Explication par approche phénoménologique inspirée**

Le principe consiste à découpler le mouvement de chute circulaire des planches en deux mouvements perpendiculaires :

- Dans la direction verticale se reproduisent les conditions de l'expérience de Galilée décrite plus haut : les deux planches font l'objet du même traitement.
- Dans la direction horizontale en revanche, plus rien ne compense la différence d'inertie entre les deux planches : la plus lourde est plus difficile à mettre en mouvement, elle tombe plus lentement que la planche non lestée.

Voir également l'article cité ci-dessus pour davantage de précisions.

### **Analyse de l'atelier**

Cette fois, les participants « jouent le jeu » en tentant de se mettre à la place d'un enfant. Ainsi, avançant que l'explication scientifique fait appel à l'inertie, un participant avance l'idée qu'un enfant expliquerait cela en parlant du centre de gravité. Pour étayer sa proposition, il met le marteau scotché à la planche tantôt en haut, tantôt en bas

N'ayant aucune idée des principes scientifiques pouvant expliquer le résultat obtenu, un participant se lance dans une explication clairement phénoménologique :

- « Celui qui a le marteau, il a plus de peine à se mettre en route. Il a l'air d'avoir du mal à démarrer ».

Cette première explication est complétée par des expériences ressenties comme analogues, mais où le vocabulaire scientifique refait surface :

- « *Quand il tombe, il doit faire un arc de cercle. Or, si j'essaie de faire tourner mes deux bâtons, je constate que j'ai plus de peine avec celui qui est lesté. C'est la même chose qu'avec les petites voitures à friction. Quand on a la masse sur la circonférence, ça a tendance à tourner pendant longtemps, mais ça met du temps à démarrer. Ou bien la roue de vélo, le départ est plus difficile si la gente est lourde que si elle est légère* » (clip 10).

Finalement, les explications trouvées correspondent à un niveau de formulation phénoménologique tout à fait remarquable :

- « *Au départ, ils sont attirés directement vers le sol (son geste montre la direction perpendiculaire au sol) et donc le démarrage pour les faire basculer demande plus de « force » et donc plus de temps pour démarrer... parce qu'il y en a un qui est plus « ancré » dans le sol, si je puis dire* » (clip 10).

Un autre participant, pour étayer cette explication, prend l'exemple de l'arbre abattu par un bûcheron. Plus l'arbre est gros, plus il va mettre de temps pour se « décider » à tomber (clip 11).

Cette expérience fait naître un questionnement intéressant sur la signification de la « dé-formalisation ». En effet, dans nos explications nous avons nous-mêmes utilisé la notion d'inertie. Or, cette dernière n'est pas comprise, « sentie » par le participant qui a émis la dernière proposition. Un de ses collègues pose alors la question de l'importance du mot par rapport à la compréhension de l'action. En d'autres termes, il demande :

- « *Est-ce que c'est plus faux dans ma tête de croire que ça met plus de temps à tomber, parce que c'est plus « lourd » entre guillemets ?* » (clip 15).

Nous pensons que oui, car le terme « lourd » est associé à la propriété d'un corps à être attiré par la terre et non pas à la difficulté qu'il y a à le mettre en mouvement. Même s'il se trouve que ces deux propriétés sont directement liées, comme nous l'avons vu dans le corps de l'article... Il convient donc dans ce cas de remplacer le terme « lourd » par l'expression « difficulté à être mis en mouvement ». Car l'emploi de l'approche phénoménologique ne dispense pas de faire preuve de la même rigueur que l'approche théorique : l'un de ses rôles est de permettre l'introduction ultérieure des concepts scientifiques et si leur première approche est ressentie, elle se doit d'être exacte.

Cette remarque permet de revenir sur la définition, qui ne concerne que la « dé-formalisation » de notions spécifiques aux sciences. Si « lourd » est déjà un concept, il fait partie du langage courant et, associé à « prend plus de temps » il peut en effet, remplacer avantageusement, du moins dans une première approche, le concept d'inertie.

### **TROISIEME EXEMPLE : L'AIMANT DANS LE TUBE**

#### **Catégorie de l'expérience : 2**

**Matériel :** *Un aimant, un tube de carton, de cuivre, un rouleau de feuille d'aluminium, un lampe de poche fonctionnant sur le principe de la dynamo (lampe de Faraday).*

**Description de l'expérience :** L'aimant est lâché à travers le tube de carton vertical et rattrapé immédiatement à la sortie. Puis le tube de carton est remplacé par le tube de cuivre et l'opération est réalisée à nouveau. Le même essai est réalisé avec le rouleau d'aluminium.

**Observations :** Dans les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> tubes, l'aimant tombe extrêmement lentement. Pourtant, on montre qu'il n'est pas attiré par leurs matériaux, sauf « dynamiquement », si on le déplace légèrement le long de leur paroi.

#### **Explication par « reformulation »**

La loi de Lenz indique que lorsqu'un matériau conducteur est traversé par le flux variable d'un champ magnétique, il produit en réaction un champ magnétique dynamique qui s'oppose à la variation de flux. Ce champ magnétique est donc de sens opposé à celui de l'aimant qui tombe, qui est par suite repoussé vers le haut. Mais plus il ralentit, plus le champ qui lui est opposé est faible : il atteint donc une vitesse limite, inférieure à celle de sa chute libre.

### ***Explication par approche phénoménologique inspirée***

L'approche est délicate et consiste à associer une démonstration expérimentale avec des connaissances pas tout à fait communes puisqu'elles supposent la notion de résistance électrique et d'effet Joule, ainsi que le principe de la conservation de l'énergie. Mais en supposant ce prérequis, on commence par montrer, à l'aide d'une lampe de Faraday ou d'une dynamo de vélo, qu'un matériau conducteur placé devant un champ magnétique variable est le siège de courants électriques.

Or ces courants, en parcourant le tube de cuivre, dégagent de la chaleur par « effet Joule », comme dans une ampoule à incandescence ou un radiateur électrique (le problème est compliqué par le fait que, dans le cadre de cette expérience, la production de chaleur est imperceptible).

Cette chaleur, conformément au principe évoqué plus haut, doit être « prise » quelque part. Or la seule source n'énergie possible est la chute de l'aimant : cette dernière est donc ralentie.

L'explication est moins convaincante que les autres. Néanmoins, elle permet tout de même d'éviter la référence à la loi de Lenz, tout à fait opaque pour qui n'a jamais étudié l'électromagnétisme.

### ***Analyse de l'atelier***

La possibilité de manipuler, non seulement l'aimant et le tube de cuivre, mais également la lampe de Faraday, permet une première proposition : un courant électrique doit se créer à l'intérieur du tube. Cherchant à s'éloigner d'une explication utilisant le concept d'énergie, une deuxième proposition se dirige vers la notion de force, une force poussant vers le haut retenant la chute de l'objet.

Un intervenant pose alors une question fondamentale : jusqu'à quel point peut-on se passer de concepts scientifiques ? En l'occurrence, en utilisant la notion d'énergie, il offre une troisième proposition : le fonctionnement de la lampe montre qu'il y a production d'énergie lorsque l'aimant passe entre les fils de cuivre. Dans le cas du tube :

- « Une partie de l'énergie de la chute est transférée au tube, ce qui fait que ça tombe moins vite » (clip 16).

Nous sommes là dans une phase importante de la construction d'une approche phénoménologique : si certaines expériences peuvent se détacher totalement de certains concepts, comme l'expérience du blanc d'œuf où l'observation, bien que dirigée, suffit, d'autres font appel à certains prérequis, comme l'énergie dans l'exemple du tube. Il importe alors, à ce stade, de rendre ces concepts les plus « tangibles » possible, en évitant les références trop abstraites.

- « Les sciences ne peuvent pas aller contre les signaux sensoriels que l'on reçoit. (...) La physique nous parle du monde matériel autour de nous, la seule façon dont on puisse l'appréhender c'est bien à travers nos sens ou à travers des instruments de mesure mais qui sont des améliorations de nos sens, d'une certaine façon » (clip 18).

Or, en ce qui concerne ce concept, qui plus est sa conservation, une telle dimension est extrêmement difficile à atteindre. On peut même dire, en se référant à l'histoire des sciences, que le concept d'énergie ne peut être abordé d'une manière intuitive (clip 19). Néanmoins, un participant relève que le principal apport de cette réflexion sur la « dé-formalisation » des sciences et la recherche d'explications phénoménologiques réside dans la mise en évidence d'un certain nombre de concepts fondamentaux, incontournables, ainsi que dans la recherche de niveaux de formulation adaptés, variant en fonction de l'âge ou des connaissances déjà acquises (clip 19).

Cette réflexion rejoint celle de Giordan [32] sur la mise en évidence de certains « concepts organisateurs » offrant des points de repères et d'ancrage à l'acquisition des connaissances (On a également parlé de concepts « intégrateurs » (Haguenaer, 1995) ou « structurants » comme les envisage Ausubel (1966) avec ses « organizers »).